

N° d'ordre : 2822

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Véronique CUCCHI**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **Sciences du Bois**

**SENSIBILITÉ AU VENT DES PEUPELEMENTS DE PIN MARITIME
(*Pinus pinaster* Ait.)**

**Analyse comparative de dégâts de tempête,
étude expérimentale et modélisation de la résistance au déracinement.**

Soutenue le : 14 juin 2004

Après avis de :

MM. GARDINER B. A., Professeur, Forestry Commission
(Nom et titre) HOULLIER F., Directeur de Recherche, INRA

Rapporteurs

Devant la commission d'examen formée de :

MM. SCHÜTZ J.-P., Professeur, ETH Zürich
(Nom et titre) GARDINER B. A., Professeur, Forestry Commission
HOULLIER F., Directeur de Recherche, INRA
GUITARD. D, Professeur, Univ. Bordeaux I
MEREDIEU C., Chargé de Recherche, INRA
STOKES A., Ingénieur de Recherche (HDR), INRA
SARDIN T., Ingénieur Divisionnaire des Travaux des Eaux et Forêts, ONF

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineurs

Invité

***A mon père,
lui qui savait si bien le bois et la forêt...***

Remerciements

Une thèse, c'est une personne et toutes celles qui l'accompagnent au cours de l'aventure.

Dans ce cas précis, il y eu :

- ✧ Jean-Michel Carnus pour l'Unité de Recherches Forestières, Yves Brunet et Denis Loustau pour l'Unité d'Ecologie fonctionnelle et physique de l'environnement "EPHYSE", ainsi que Patrick Castera pour le Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux. Merci à eux pour l'accueil accordé au sein de leurs labos.
- ✧ Céline Meredieu et Alexia Stokes. Elles ont été pour moi de merveilleuses encadrante et directrice de thèse, je ne saurais dire à quel point je leur suis reconnaissante pour leur disponibilité, le temps consacré, nos discussions, cet apprentissage du travail d'équipe et du travail de recherche en général. Un grand merci à vous les filles!!
- ✧ Bernard Issenhuth, Hervé Lataillade, Nicolas Cheval, Henri Bignalet, Edgar Borg...tout ceux qui ont eu le courage de partir avec moi sur le terrain, en trimbalant des tonnes de matériel sur des parcelles souvent peu praticables, certains ont même grimpé aux arbres! Merci les gars...
- ✧ Didier Bert a été le premier à croire en mes capacités, c'est grâce à lui que je suis arrivée à l'INRA. Je ne serai pas là sans lui. Merci à toi, Didier, pour avoir été mon "parrain" et m'avoir initiée au Pin maritime.
- ✧ Et puis, il y eu des collaborateurs efficaces, Mohamed Najar en fut un hors pair, merci à lui pour le terrain et son contact toujours enrichissant, Alain Denis et Roland Lastennet du CDGA, et nos collègues de la Forestry Commission en Ecosse.
- ✧ Des colocataires de bureau, une mention particulière à Fredo pour les airs de whistle, le O'Rowlands, et pour m'avoir supportée. Merci d'avoir été plus qu'un collègue, un ami.
- ✧ Des informaticiens. Enfin, un surtout. Merci à Thierry Labbé, qui m'a sortie de la panade en remplaçant mon PC volé, qui a assuré mes sauvegardes quotidiennes, et bien d'autres choses encore (dont les multifasciatus et le ti-punch, miam).
- ✧ Tous ceux qui font la vie des labos autour desquels j'ai gravité ou qui ont croisé ma route, qui ont enrichi mes conversations de couloir, scientifiques ou pas, maintenu ma motivation, et grâce auxquels je me suis sentie chez moi, certains sont devenus des amis : père-mêle, Fred Danjon, Alexandre Bosc, Annabel Porté, Sylvain Delzon, Thierry Fourcaud, Philippe Ancelin, Lionel Dupuy, Damien Sellier,...je ne les cite pas tous, qu'ils ne m'en veuille pas. Mention spéciale à Stéphane Berthier, pour ses talents de grimpeur, son amitié et les discussions toujours si stimulantes.

- ✧ Bien sur, merci aux financeurs des projets qui ont permis cette thèse, le Gip ECOFOR et la DERF.
- ✧ Je remercie vivement mes rapporteurs, Barry Gardiner et François Houllier, et les membres du jury, pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, toute mon infinie reconnaissance va à ma famille, qui m'a toujours encouragée dans la voie que je me suis choisie.

Et à toi, Laurent, qui a toujours été là...

SOMMAIRE GÉNÉRAL

Chapitre I : Introduction générale	1
I - 1 Le vent, un facteur de risque pour la forêt	3
I - 2 L'observation des événements éoliens	15
I - 3 Contexte général	21
Chapitre II : Observation des dégâts dus au vent	30
II - 1 Résistance au vent de peuplements de Pin maritime dans le Sud-Ouest de la France. Influence de la densité, de la fertilisation et de l'amélioration génétique sur deux dispositifs endommagés par la tempête du 27 décembre 1999 - Article paru dans <i>Annals of Forest Science</i>	32
II - 2 Influence de la gestion sylvicole sur la sensibilité au vent des peuplements forestiers monospécifiques et équiennes	33
Chapitre III : Expérimentation <i>in situ</i> de l'ancrage racinaire	41
III - 1 Ancrage racinaire du Pin maritime selon différentes conditions de sol et d'exposition aux vents dominants - Article paru dans <i>Trees - Structure and Function</i>	43
III - 2 Le comportement d'endommagement du Pin maritime dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne	44
Chapitre IV : Modélisation des vitesses critiques de vent	58
IV - 1 Modélisation des vitesses critiques de vent pour des peuplements simulés de Pin maritime à l'aide de la connexion Capsis-PP3/ForestGALES - Article soumis à <i>Forest Ecology and Management</i>	60
IV - 2 Fonctionnement de GALES et ajustement des relations pour le Pin maritime cultivé dans les Landes de Gascogne	77
Chapitre V : Conclusion générale, perspectives	87
V - 1 Conclusions sur la prédiction des vitesses critiques de vent pour le Pin maritime	89
V - 2 Eléments apportés à la compréhension de la stabilité au vent du Pin maritime	92
V - 3 Le passage au niveau "arbre"	94
V - 4 Prédire le risque, et effectuer des recommandations sylvicoles	96
Bibliographie	98
Annexes	108

Chapitre I

Introduction générale



Plaque racinaire d'un sapin ruiné par la tempête de décembre 1999,
Domaine de l'Hermitage, INRA de Bordeaux, Cestas Pierroton.
Photo prise en janvier 2000.

Sommaire

- Chapitre I -

Introduction générale

I - 1	Le vent, un facteur de risque pour la forêt	3
I - 1.1	Les risques forestiers et leurs gestions	3
I - 1.2	Le risque lié au vent	4
I - 1.2.1	L'action du vent sur l'arbre et le peuplement : les facteurs permettant d'estimer la force de vent entraînant la ruine	7
I - 1.2.2	La caractérisation du climat d'une région et la probabilité d'occurrence de vents forts	10
I - 1.3	Les modèles de prédiction du risque lié au vent	11
I - 2	L'observation des évènements éoliens	15
I - 2.1	Les tempêtes en France et les dégâts forestiers	15
I - 2.2	Les tempêtes des 26, 27 et 28 décembre 1999	17
I - 2.3	Evènements éoliens exceptionnels et changement climatique	20
I - 3	Contexte général	21
I - 3.1	Les enjeux liés à la forêt française et le cas du massif landais	21
I - 3.2	Impact des conduites sylvicoles sur la résistance au vent des peuplements	24
I - 3.3	Cadre et présentation de la thèse	28

I - 1 Le vent, un facteur de risque pour la forêt

Le quart de surface du globe actuellement occupé par les forêts recèle la grande majorité de la diversité spécifique et des ressources génétiques terrestres (SOFO 1999). La forêt est envisagée de façon récente comme facteur d'atténuation des changements climatiques à l'échelle planétaire (protocole de Kyoto). Elle représente une source de matières premières, de matériaux et d'énergie. Elle est aussi utilisée comme protection contre le vent, la désertification et l'érosion des sols.

I - 1.1 Les risques forestiers et leurs gestions

Le risque naturel est l'aléa d'un phénomène naturel (géologique, météorologique, hydrologique, nivologique, autre) menaçant des intérêts humains. Evaluer les risques nécessite la connaissance des phénomènes et des intérêts mis en jeu sur une zone et une période données. Actuellement, en France, le risque naturel est pris en compte de façon croissante. En 1995, le Plan de Prévention des Risques naturels (PPR) a été mis en place pour considérer ce risque dans l'aménagement, la construction et la gestion des territoires. Il implique la surveillance des phénomènes générateurs de risque et de leur évolution, ainsi que la mise en place de systèmes d'alerte et de mesures de protection (alerte météorologique, par exemple).

Pour les forêts, le risque naturel peut être biotique ou abiotique. Le risque abiotique correspond à l'endommagement du peuplement forestier provoqué par un facteur de type environnemental physique, souvent lié aux conditions climatiques. Il est donc dépendant de l'état de l'atmosphère. Citons comme principaux risques abiotiques : le feu, la sécheresse, la neige, le vent, la glace, le gel, l'inondation, les glissements de terrain, le volcanisme. La mortalité des arbres s'accroît de façon brusque et importante, soit par atteinte physiologique, par exemple par dessiccation, soit par destruction physique de tout ou partie de l'arbre. En Suisse par exemple, les renversements et casses d'arbres liés à la charge du vent et au poids de la neige dans les peuplements forestiers représentent une perte annuelle de 4 millions de m³ de bois (Valinger et Fridman 1999). Le risque biotique correspond aux attaques d'insectes ravageurs et de champignons pathogènes. Risques biotiques et abiotiques peuvent se rejoindre : les dégâts ou le stress provoqués par des agressions physiques constituent des portes d'entrée temporaires pour les ravageurs et maladies, appelés alors parasites de faiblesse.

Les risques forestiers n'ont de sens que pour les forêts générant des intérêts humains, et notamment pour les plantations où l'investissement financier est important. Le risque en forêt de plantation se traduit par des pertes économiques, à la fois par la destruction de tout ou partie du volume de bois sur pied et par la diminution de la qualité du bois. Le ressenti humain face à ces phénomènes revêt également de l'importance, par le sentiment d'impuissance face à la destruction d'un patrimoine collectif.

La gestion de ces risques forestiers implique quatre phases explicitées par Gardiner et Quine (2000) :

- l'identification du phénomène responsable du risque (vent, neige, feu, etc...)
- l'estimation de sa probabilité d'occurrence et de ses conséquences. Il faut tout d'abord estimer l'exposition du peuplement au facteur de risque, en terme d'intensité, de fréquence et de durée. Ensuite, l'exposition est reliée à la prédiction de la sensibilité du peuplement au stress induit, et à l'amplitude de la réponse par rapport à l'intensité de ce stress, ce qui détermine l'amplitude des dégâts.
- les possibilités d'action liées au risque. Une fois le risque connu, plusieurs alternatives sont envisageables par le gestionnaire : accepter les pertes encourues, les partager au travers des assurances, ou tenter de les limiter. Le dernier cas est la stratégie la plus communément adoptée. Limiter les pertes revient alors soit à éviter les zones concernées par le risque (géographiquement par exemple), soit à prendre des mesures sylvicoles pour diminuer la vulnérabilité du peuplement.
- le choix des réponses face au risque, directement en relation avec la sensibilité personnelle du gestionnaire : aversion du risque, neutralité ou capacité à prendre des risques.

I - 1.2 Le risque lié au vent

Les manifestations de grand vent se déclinent suivant différents phénomènes, distincts selon la vitesse et la nature du vent (Bouchon 1987, Doll 1988) : ouragan, tornades, tempêtes. Deux échelles de classification de la force du vent sont couramment employées : l'échelle de Beaufort (1805), adoptée par les marins de façon internationale et complétée en 1906 et 1944 pour les très grandes vitesses, et l'échelle de Fujita (1971). Elles associent toutes deux une gamme de vitesse avec une appréciation de la force et une description de l'action du vent sur les infrastructures humaines et les arbres. Sur l'échelle de Beaufort, une "tempête" correspond à des vents compris entre 89 et 102 km.h⁻¹ (force 10) moyennés sur 10 minutes à 10 m de hauteur. Les effets terrestres associés sont : "Arbres déracinés, dommages



Photo : T. Fourcaud, CIRAD-INRA

Un cèdre ruiné par la tempête de 1999, à Toctoucau, commune de Cestas (33).

Photo prise en janvier 2000.

importants aux habitations". Une "violente tempête" se situe entre 103 et 117 km.h⁻¹ (force 11), et au delà, c'est l'"ouragan" (force 12 ; effet terrestre : "Dévastation"). Le vent est caractérisé par une succession très rapide de rafales et de plats : la vitesse du vent est la moyenne sur 10 minutes de ces rafales et de ces plats tandis que la vitesse instantanée est la vitesse d'une rafale. En France, le seuil retenu par les assureurs pour indemniser les dégâts dus au vent est de 100 km.h⁻¹ en vitesse de vent instantanée (intégrée sur 0,5 s). Cependant, la notion de tempête n'implique pas seulement une vitesse de vent mais aussi une extension spatiale de ce vent.

La sensibilité au vent des forêts ne met pas toujours en cause ces évènements climatiques exceptionnels : de simples coups de vent, moins forts mais plus fréquents, causent également des dégâts, plus légers car à l'échelle de l'arbre, mais aussi plus réguliers.

Le vent constitue pour les forêts un des facteurs destructifs les plus importants avec les incendies et les ravageurs (Biro et Gollier 2001, SOFO 2003). Cependant, les dommages causés aux arbres par le vent peuvent être envisagés de façon positive : ces perturbations constituent un moteur de la dynamique des écosystèmes forestiers naturels. Wolf *et al.* (2004) évoquent l'endommagement des arbres dominants par le vent lors d'une tempête comme un processus complémentaire de la mortalité liée à la compétition intra spécifique. Le vent permet la création de trouées plus importantes que celles induites par la mortalité compétitive, et dans lesquelles s'établissent des essences héliophiles. En forêt boréale russe, Ulanova (2000) a montré l'importance des micro-reliefs créés par les arbres déracinés pour la richesse spécifique de la flore, le recrutement de certaines espèces, la répartition spatiale des individus.

Pour réduire le risque lié au vent sur les peuplements de production, des stratégies préventives de conduite sylvicole doivent être élaborées en amont, car aucune action n'est possible pour protéger les peuplements au moment où se produit l'aléa. La Forestry Commission (Grande Bretagne) a édité un ensemble de recommandations sylvicoles à l'usage des exploitants forestiers pour limiter les dégâts liés au vent, fréquents dans ce pays (Quine *et al.* 1995). Ceci est surtout valable dans les cas de "coup de vent", moins pour les fortes tempêtes, qui engendrent de toutes façons d'importants dommages.

Dans le cadre des forêts de production, les pertes économiques peuvent être de diverses natures (Biro et Gollier 2001) : i) les pertes directes dues aux arbres détruits, aux difficultés d'accès à la parcelle, à la baisse de la qualité du bois, à la chute des prix due à la saturation du marché, aux coûts additionnels du nettoyage de la parcelle, du transport, de la récupération et du stockage du bois ; ii) les pertes futures liées à la valeur des arbres

prématurément exploités ; iii) les pertes dues au coût additionnel du reboisement ; iv) les pertes annexes, par exemple la location de terrains de chasse ; v) les pertes de rentrées régulières de liquidités, dues aux "trous" dans la future production de bois. L'évaluation économique des dégâts potentiels est essentielle pour la prise de décision et la prise en compte du risque.

L'estimation du risque pose deux questions fondamentales : **i) quel vent est nécessaire pour ruiner mon arbre ou mon peuplement?**, et **ii) quelle est la période de retour de ce vent pour la région concernée et sur un laps de temps donné?** C'est sur ces deux questions que se révèlent les difficultés inhérentes à la gestion de ce risque.

I - 1.2.1 L'action du vent sur l'arbre et le peuplement : les facteurs permettant d'estimer la force de vent entraînant la ruine

L'action physique du vent sur un couvert forestier se déroule à plusieurs échelles, du massif à l'arbre en passant par le peuplement.

Le vent transmet à l'arbre une charge physique, principalement au niveau du houppier. Cette charge est dépendante i) de la vitesse du vent et de sa direction, qui varient avec la hauteur (profil de vent), ii) des caractéristiques dendrométriques et de forme de l'arbre, la charge du vent, ou force de traînée, étant directement proportionnelle à la surface de houppier sous le vent (Faure et Pellet 1984)). Cette surface de houppier varie selon la vitesse du vent qu'elle subit (Mayhead 1973). De plus, l'oscillation des branches participe à l'amortissement d'une partie de la charge transmise par le vent (Wood 1995)). La force du vent appliquée sur le houppier est transmise au système racinaire par l'intermédiaire de la tige. Cette transmission est dépendante des caractéristiques mécaniques du bois, notamment le module d'élasticité global de la tige, son module de rupture, et l'ensemble des facteurs qui influencent la résistance (nœuds, agents pathogènes...). Les racines réagissent à cette force par une mise en tension (au vent) ou en compression (sous le vent) et par des battements liés à la nature pulsatoire du vent. La résistance du système racinaire est dépendante de la morphologie et de la topologie de ce système, de l'équilibre de masse entre partie aérienne et partie racinaire, de la nature du sol (Day 1950, Coutts 1983, Nicoll *et al.* 1995, Stokes *et al.* 2000, Dupuy *et al.* 2003). La topologie des racines est elle-même dépendante de ce sol par les contraintes de croissance : les obstacles, l'hypoxie, la richesse en minéraux (Fayle 1975, Gersani et Sachs 1992, Tardieu 1994, Bennie 2002, Bingham et Bengough 2003). Le battement des racines et le frottement racines/sol sont influencés par l'état du sol au moment

du coup de vent (taux d'humidité, (Day 1950)), sa nature et sa résistance au cisaillement (Wu *et al.* 1988). Le poids de l'arbre, réparti entre le houppier, la tige et le complexe formé par les racines englobant la motte de sol, joue également un rôle en résistant à la charge du vent, jusqu'à ce que l'arbre s'incline suffisamment pour dépasser le point d'équilibre. Au delà, son poids contribue à sa chute. Dans ce contexte, la répartition de la masse aérienne peut influencer sur la résistance, par exemple en abaissant le centre de gravité de l'arbre.

Coutts (1983, 1986) a étudié le processus de déracinement chez l'Epicéa de Sitka en décomposant la résistance de l'ancrage en quatre phases :

- résistance du sol au cisaillement sous et à la lisière de la plaque,
- résistance des racines au vent à la tension,
- poids de la plaque racinaire,
- résistance des racines sous le vent à la compression.

Coutts (1986) et Blackwell *et al.* (1990) ont ensuite élaboré un modèle d'ancrage (Figure I - 1). Ce modèle de la résistance du système racinaire à l'arrachage décompose la dynamique

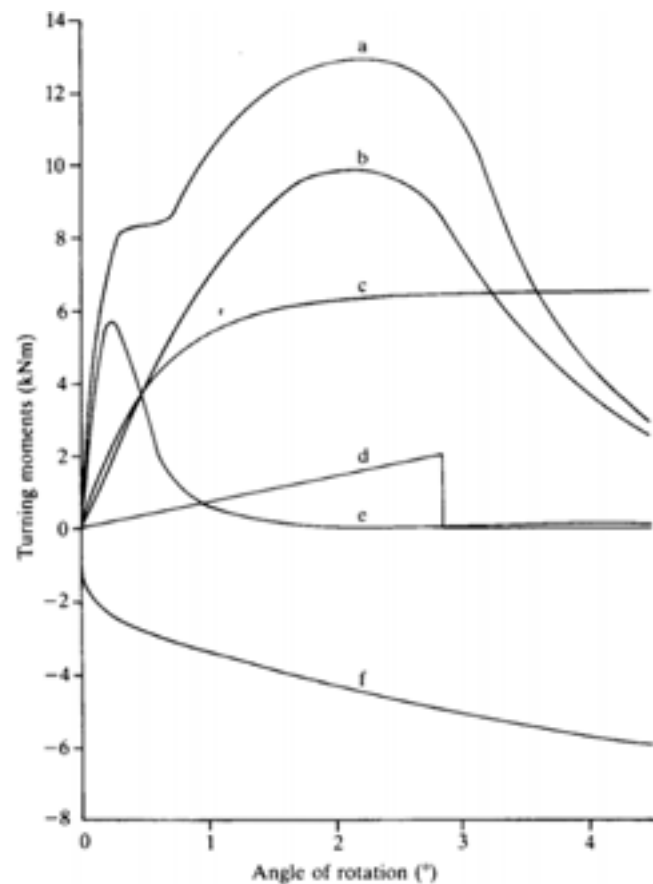


Figure I - 1 : Le modèle d'ancrage de Blackwell, Rennolls et Coutts, d'après Blackwell *et al.* (1990) publié dans *Forestry* ; **a** moment net total dû à la résistance de l'ancrage, **b** tension des racines, **c** poids du complexe sol-racines, **d** flexion des racines sous le vent, **e** tension du sol, **f** poids de la tige et de la couronne.

du déracinement. La somme de tous les moments donne le moment total de renversement de l'arbre.

Les mécanismes biologiques d'adaptation au stress généré par des vents réguliers sont également impliqués dans la résistance des arbres : mise en place de bois de réaction dans la partie aérienne - bois de tension chez les feuillus, de compression chez les conifères - (Telewski 1995, Telewski et Jaffe 1981), mais aussi croissance adaptative des racines. Nicoll et Ray (1996) et Stokes *et al.* (1997) ont montré sur *Picea sitkensis* que les racines placées sous le vent et au vent, respectivement sollicitées en compression et en tension, développent des adaptations de forme leur permettant de mieux résister à ces sollicitations.

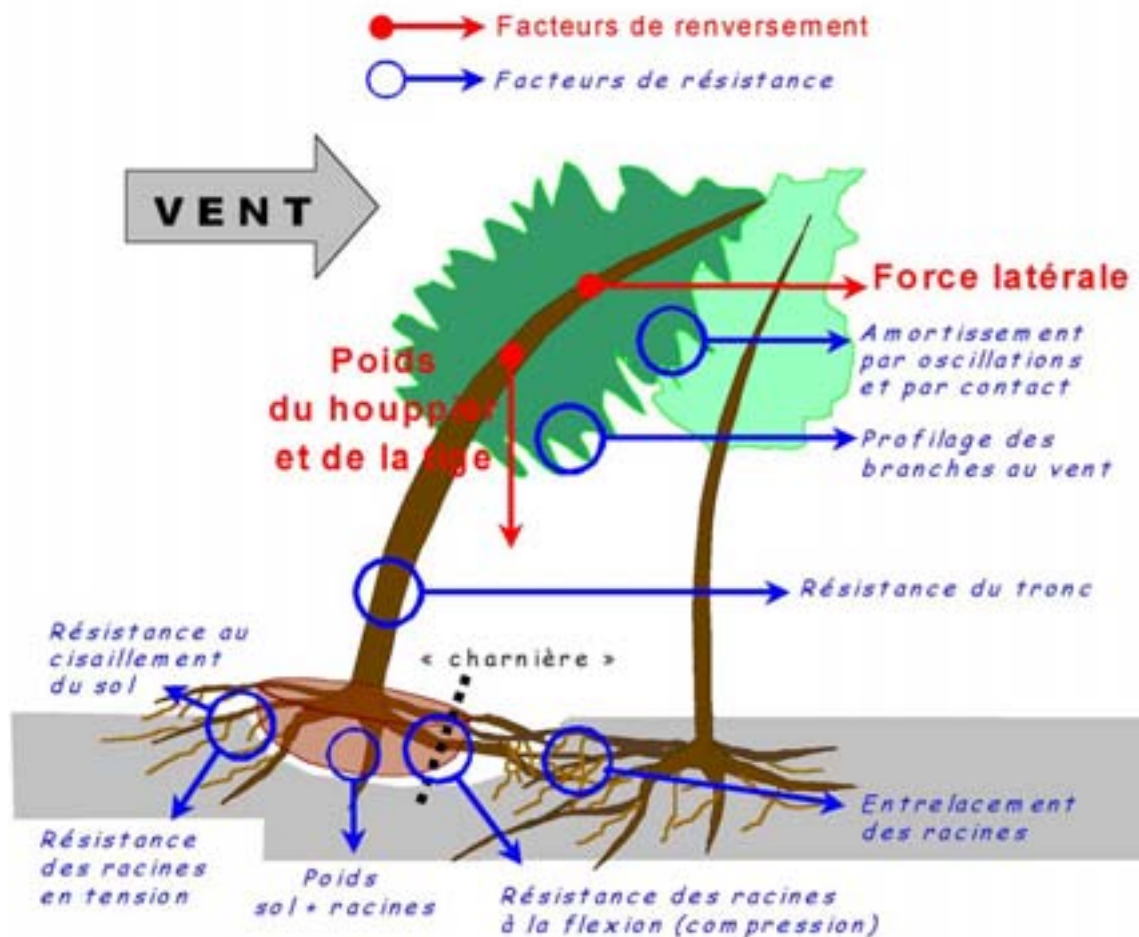


Figure I - 2 : Schéma représentant les forces agissant sur l'arbre pour le déraciner, et les facteurs participant à sa résistance. L'arbre a dépassé son point d'équilibre : la biomasse aérienne participe au renversement. La force latérale appliquée principalement au niveau du houppier est dépendante de la vitesse du vent, de la surface de houppier exposée au vent et de la porosité de ce houppier.

Dans le cas d'un ancrage peu profond, ces racines accroissent la tenue au vent de l'arbre en améliorant la rigidité de la plaque racinaire. Ces mécanismes adaptatifs suggèrent que la réaction d'un arbre soumis à la charge du vent est liée à l'histoire de l'individu.

En peuplement, le contact des branches entre houppiers voisins augmente l'amortissement de la charge transmise par le vent (Milne 1991, Wood 1995, Kerzenmacher et Gardiner 1998), et l'enchevêtrement des systèmes racinaires améliore la stabilité individuelle (Smith *et al.* 1987). La figure I - 2 présente les facteurs principaux impliqués dans la résistance au vent des arbres en peuplement, après le passage de l'arbre au delà de son point d'équilibre.

Le comportement du vent s'écoulant au dessus de la canopée d'un peuplement forestier peut être assimilé de façon empirique à la relation entre la résistance de l'air passant sur une surface et la rugosité de cette surface (Oliver et Mayhead 1974). Finnigan et Brunet (1995) ont montré, lors de l'écoulement du vent sur la canopée, la formation de turbulences selon un schéma défini. Ces turbulences sont organisées en bourrasques cohérentes, correspondant à de forts accroissements de la vitesse du vent, agissant bien au delà de la lisière du peuplement. Au sein même du peuplement, ces bourrasques provoquent des dégâts importants, car elles représentent une force 10 fois supérieure à la force générée par le vent moyen. Compte tenu de ces phénomènes de turbulence, il est difficile prédire la charge du vent à l'échelle de l'individu. De plus, les caractéristiques dendrométriques aux diverses échelles ainsi que la topographie du site influencent le profil du vent et son écoulement au sein du peuplement.

I - 1.2.2 La caractérisation du climat d'une région et la probabilité d'occurrence de vents forts

L'enregistrement de données régulières de vitesses de vent est lié à l'apparition des stations météorologiques (1854 en France, 13 stations ; 1860 : premier réseau européen pour la prévision du temps) et à l'invention des anémomètres, notamment l'anémomètre à coupelles inventé par Robinson en 1846, encore utilisé aujourd'hui. L'avènement des stations météorologiques modernes et de l'ordinateur permet maintenant l'acquisition automatique et le stockage de volumes importants de données. Cependant, étant donné le peu de recul dont nous disposons, la prédiction des vitesses de vent à court terme reste difficile. Ce recul est de plus limité par l'emploi d'anémomètres différents, lié à l'évolution des appareils de mesure (Drevetton 2002). Ces mesures de vent sont localisées, mais difficiles à spatialiser. Enfin, la violence du vent entraîne parfois la destruction des appareils. L'une des difficultés majeures des observations faites sur les dégâts de tempête est l'absence de données sur le vent ayant agit sur le peuplement (vitesse, fréquence, rafales, écoulement,...).

L'estimation de la probabilité de vents violents sur une zone donnée est nécessaire à l'estimation du risque. En Grande Bretagne, entre 1970 et 1980, un nombre important de sites ont été caractérisés par la Forestry Commission selon leur niveau d'exposition au vent (ou "zone de vent"), évaluée de façon indirecte en mesurant la perte de surface d'un carré de coton due à l'érosion induite par le vent, et le niveau de "protection" topographique du site lié au relief alentour. Ce paramètre est appelé "TOPEX", ou Topographic Exposure. Dans les années 1980, la Forestry Commission développe alors la Windthrow Hazard Classification (WHC) (Miller 1985). Cette méthode attribue une classe de risque de vent à une zone géographique donnée, cette classe résultant de la somme des scores des quatre facteurs pondérés suivants : "zone de vent", altitude, "TOPEX", type de sol. Six classes de risque de dégât lié au vent ont été définies dans la WHC, de la classe "1" la moins risquée à la classe "6" la plus risquée. En 1997, Ruel *et al.* ont montré que le rapport [performances/facilités de calcul] de la méthode TOPEX permet d'envisager cette technique pour élaborer un système de probabilité de taux de dégâts (Ruel *et al.* 1997).

De nombreuses autres techniques ont été utilisées pour pallier au manque de données *in situ*, afin de représenter géographiquement le climat de vent : modèles topographiques d'essais en soufflerie (simulation d'écoulement des vents) (Inglis *et al.* 1995, Ruel *et al.* 1997), modèles numériques basés sur le comportement d'écoulement des vents tels qu'utilisés en météorologie, méthodes empiriques telles que les indices de déformation des arbres.

Le DAMS (Detailed Aspect Method of Scoring) est le système d'attribution du "score de vent" actuellement utilisé en Grande Bretagne pour caractériser le climat de vent d'une zone. Quine (2000) a relié ce système de score à la fréquence de distribution de vitesse de vent paramétrée classiquement en météorologie grâce au modèle de Weibull, en établissant des relations entre la valeur du DAMS et les paramètres A et k caractérisant la forme de la distribution. Ainsi il est possible avec le DAMS d'estimer la probabilité d'occurrence des vitesses de vent extrêmes sur le site.

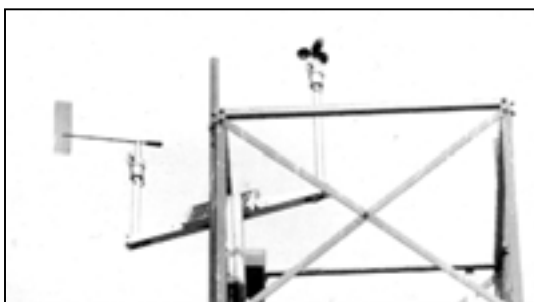
I - 1.3 Les modèles de prédiction du risque lié au vent

Pour évaluer le risque de vent, les sylviculteurs ont utilisé des indicateurs de stabilité tel que le coefficient de forme "Hauteur moyenne du peuplement/Diamètre moyen à 1.3 m" (Pardé et Bouchon 1988) : le peuplement est jugé stable en dessous de 80, et instable au dessus de 100. Dans le même esprit, Becquey et Riou-Nivert (1987) ont défini des zones de stabilité en mettant en relation le pourcentage de dégâts avec le coefficient de forme versus la hauteur dominante des peuplements de *Picea abies* et d'*Abies alba* du Massif Central, endommagés

La mesure du vent



Pylône de dix mètres pour la mesure du vent, ici à Roissy. (Photo Météo-France, P. Taburet)



Le vent variant beaucoup en fonction de la hauteur de mesure, surtout dans les premiers mètres au-dessus du sol, il est primordial que les mesures se situent partout à la même hauteur si l'on veut pouvoir les comparer. L'OMM préconise une mesure à 10 mètres au-dessus d'un sol de 0,03 mètres de longueur de rugosité*, ce qui correspond à un terrain dégagé recouvert d'herbe rase. Les obstacles doivent être situés à une distance supérieure à dix fois leur hauteur.

Météo-France utilise pour la mesure du vent les capteurs suivants, placés au sommet d'un pylône de dix mètres :

- L'**anémomètre à coupelles** pour la mesure de la vitesse instantanée du vent. Ses coupelles tournent plus ou moins vite selon la vitesse du vent ; un compte-tours optique situé dans le corps du capteur indique à la station automatique la vitesse du vent. La résolution de la mesure est d'un dixième de mètre par seconde (m/s). La vitesse du vent est mesurée toutes les 500 millisecondes et est caractéristique d'un intervalle de temps de 500 ms.
- La **girouette** pour la mesure de la direction du vent. Le drapeau de la girouette (en forme de dérive d'avion) s'oriente dans le lit du vent et un codeur optique d'angle permet d'en déduire la direction d'où vient le vent. La résolution de la mesure est de 10 degrés. La direction du vent est mesurée toutes les 300 millisecondes et est caractéristique d'un intervalle de temps de 500 ms.

A partir de ces mesures, la centrale de mesures associée aux capteurs calcule diverses valeurs moyennes et divers extrema, parmi lesquels:

- la vitesse maximale instantanée quotidienne du vent, maximum de la vitesse instantanée entre 0 h UTC le jour J et 0 h UTC le lendemain ;
- la vitesse moyenne du vent sur dix minutes (vent synoptique) ;
- la direction moyenne du vent sur dix minutes (vent synoptique).

Ces données sont archivées dans la base de données climatologiques de Météo-France, au pas de temps quotidien pour le premier, au pas de temps horaire pour les deux suivants.

En haut du pylône, les capteurs de vent : la girouette à gauche, et l'anémomètre à droite.
(Photo Météo-France, P. Taburet)

D'après (Drevet, 2002), "L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950 - 1999", La Météorologie, 8^{ème} série, n° 37, mai 2002.

* longueur de rugosité ou z_0 : hauteur au-dessus du sol où la vitesse du vent en théorie est égale à zéro, définition d'après l'Atlas Éolien Européen (Troen et Petersen, 1991), Risoe National Laboratory, Risoe, Danemark.

par la tempête de 1982. Trois zones, "peuplement stable", "peuplement peu stable" et "peuplement instable" sont alors délimitées, associées à des recommandations sylvicoles, respectivement "éclaircie forte possible", "éclaircie forte risquée" et "avec ou sans éclaircie". La progression entre le simple coefficient de forme et les zones de stabilité proposées par Becquey et Riou-Nivert consiste dans la prise en compte, en plus des dégâts observés, des caractéristiques dendrométriques des peuplements.

Par la suite, à partir des modèles de prédiction du risque de vent, des outils d'aide à la décision destinés aux sylviculteurs ont été élaborés.

Une première catégorie d'outil est de type booléen : une classification du risque de dégât est obtenue à partir des conditions climatiques d'un site et des caractéristiques pouvant influencer la tenue au vent des arbres (caractéristiques de la végétation, sol, etc...). Un exemple marquant est celui des classes issues de la WHC, associées à deux hauteurs dominantes caractérisant la stabilité du peuplement considéré : une hauteur dite "critique" à laquelle les dégâts commencent à se manifester, et une hauteur dite "terminale" à laquelle les dégâts se propagent dans le peuplement pour atteindre un taux de 40% (Quine 1995, Quine *et al.* 1995). Lokes et Dandul (2000) ont développé en République Tchèque un système similaire à la WHC de Grande Bretagne. Ce système, WINDARC (WIND DAMAGE Risk Classification), a permis de classer les peuplements forestiers d'une zone définie selon neuf niveaux d'exposition au risque (1 = risque faible, 9 = risque fort). Ce niveau d'exposition est calculé selon le type de sol, la topographie, les facteurs climatiques (risque permanent) et les caractéristiques de la végétation (risque non permanent). Un Système d'Information Géographique (S.I.G.) permet de cartographier et d'analyser ces différents facteurs. Le résultat en sortie est une carte figée de la région définie.

D'autres outils d'aide à la gestion intégrant des modèles de prédiction du risque, souvent implémentés sous la forme de logiciels, donnent en sortie une probabilité de dégât. Ces modèles de prédiction sont soit probabilistes, soit déterministes. Les premiers prédisent la probabilité de dommage dû au vent pour une forêt d'une zone géographique donnée, en mettant en relation des dégâts déjà observés sur cette forêt avec des facteurs connus pour influencer la résistance au vent. Le modèle consiste souvent en une régression logistique. Citons comme exemples les modèles statistiques mis au point par Fridman et Valinger (1998), Jalkanen et Mattila (2000), Mitchell *et al.* (2001) ou Ni Dhubhain *et al.* (2001), respectivement pour prédire les dégâts dus au vent ou à la neige en Suède et en Finlande sur des peuplements mélangés dominés par *Pinus sylvestris*, *Picea abies* ou *Betula ssp.* L., les dégâts dus au vent sur des forêts mélangées de *Tsuga heterophylla*, *Thuja plicata* et *Abies amabilis* en Colombie Britannique, et des dégâts de vent sur des peuplements de

Picea sitchensis en Irlande. La régression est construite à l'aide d'observations de dégâts, collectées sur plusieurs années pour la zone géographique étudiée.

Les modèles déterministes comparent la vitesse critique estimée nécessaire pour ruiner un peuplement avec le climat de vent local pour la zone géographique du peuplement. Le but est d'estimer la période de retour de cette vitesse critique. Celle-ci est calculée de façon mécaniste, en prenant en compte les principaux facteurs exposés précédemment influençant la résistance au vent de l'arbre. Ces modèles ont été développés principalement pour le Nord de l'Europe : HWIND (Peltola et Kellomaki 1993, Peltola 1996, Peltola *et al.* 1997, Peltola *et al.* 1999b, Peltola *et al.* 2000) et GALES (Gardiner *et al.* 2000) sont les modèles mécanistes les plus marquants. Ils estiment tout deux le profil de vent sur l'arbre moyen du peuplement, puis le moment de flexion dû à la force appliquée sur l'arbre par un vent donné. Ce moment est alors comparé respectivement aux moments critiques nécessaires pour casser et déraciner l'arbre : la vitesse critique est alors calculée. Tandis que HWIND travaille en lisière de peuplement créée suite à une éclaircie, GALES travaille à l'intérieur du peuplement.

Les modèles probabilistes sont plutôt dédiés au risque sur les forêts à structure complexe, par exemple les forêts hétérogènes en âge et/ou en composition d'essences, mais, du fait de l'utilisation d'observation de dégâts pour leur mise au point, ils ne peuvent pas être extrapolés à d'autres situations. Les modèles déterministes peuvent être adaptés à d'autres essences et situations que celles pour lesquelles ils ont été mis au point, par exemple, l'adaptation de GALES pour *Abies balsamea* au Québec (Ruel *et al.* 2000), mais ils ne peuvent pour l'instant fonctionner que pour des peuplements monospécifiques et équiennes. A l'heure actuelle, il n'existe pas de modèle mécaniste mis au point pour les forêts hétérogènes en essences. Un modèle mécaniste récent, FOREOLE, existe cependant pour les forêts de *Picea abies* L. Karst hétérogènes en âge (Ancelin *et al.*, soumis à Forest Ecology and Management). Ce modèle travaille au niveau de l'arbre.

Les modèles déterministes sont structurés pour répondre successivement aux questions suivantes :

- Quelle est la charge du vent sur l'arbre pour un vent de vitesse donnée? Elle est dépendante du profil de vent sur le peuplement, des caractéristiques de l'arbre et du peuplement.
- Quelle est la réaction de l'arbre face à cette charge? C'est le calcul du moment de flexion.
- Qu'arrive-t-il à l'arbre suite à cette charge? Le moment de flexion induit par la charge du vent est comparé avec les moments critiques nécessaires d'une part pour casser l'arbre

et d'autre part pour le déraciner. La comparaison permet de dire si l'arbre casse ou non, déracine ou non, selon que le moment de flexion est inférieur ou supérieur aux moments critiques respectifs.

Le modèle calcule les vitesses nécessaires pour obtenir la casse et le déracinement. Gardiner et Quine (2000) présentent un diagramme structural de GALES explicitant le fonctionnement de tels modèles. Dans GALES, le calcul des moments critiques est basé sur une relation empirique pour le moment critique de renversement et un calcul théorique pour le moment critique de casse.

Les modèles mécanistes précédemment présentés ne sont valides que pour des charges de vent appliquées en statique, les calculs sont effectués sur l'arbre moyen du peuplement. Or, par les rafales, la charge du vent varie dans le temps : de nombreux auteurs ont mis en évidence l'importance des oscillations dans le mouvement et donc la courbure du tronc, imposant des charges répétées sur le système racinaire lorsque le patron de rafales de vent est couplé avec la fréquence naturelle d'oscillation des arbres (Fraser et Gardiner 1967, Blackburn *et al.* 1988, Milne 1991, Stacey *et al.* 1994). Des modèles au niveau arbre existent actuellement pour décrire le comportement d'arbres soumis à des charges dynamiques, par exemple England *et al.* (2000), Saunderson *et al.* (1999). Oliver et Mayhead (1974) ont montré que les arbres soumis aux rafales déracinent ou cassent à des vitesses de vent inférieures à celles prédites en situation statique. L'historique des charges subies par l'arbre au cours d'une tempête influence sa résistance à l'instant t .

I - 2 L'observation des évènements éoliens

I - 2.1 Les tempêtes en France et les dégâts forestiers

Il n'existe pas d'inventaire exhaustif des tempêtes en France remontant à plusieurs siècles. Néanmoins, quelques informations sont disponibles sur les tempêtes du siècle dernier. Depuis 1950, près de 100 tempêtes sont passées sur l'Europe occidentale, principalement au Nord. La Grand Bretagne est régulièrement touchée. En France, d'après Doll (1988), une douzaine d'évènements de type "violente tempête" se sont manifestés depuis 1958. L'auteur constate que ces grandes tempêtes ont une répartition dans le temps très irrégulière : à l'échelle du siècle, les coups de vent et tempêtes présentent une forte variabilité interannuelle, des évènements marquants successifs alternant avec des périodes de calme.

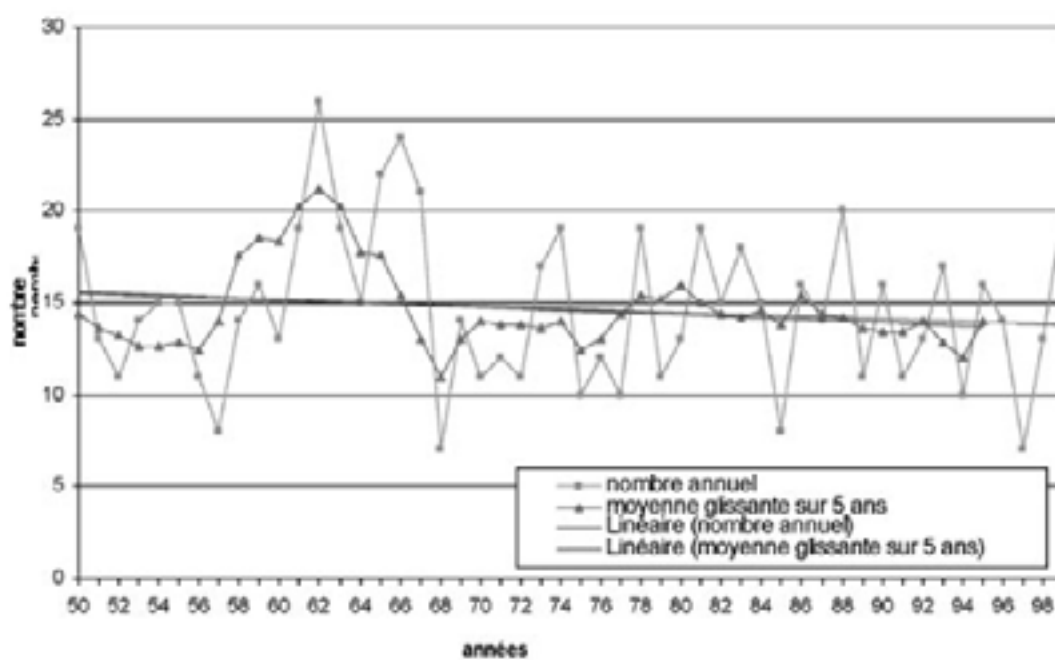


Figure I - 3 : Nombre de tempêtes observées chaque année de 1950 à 1999 (d'après Drevetton (2002)).

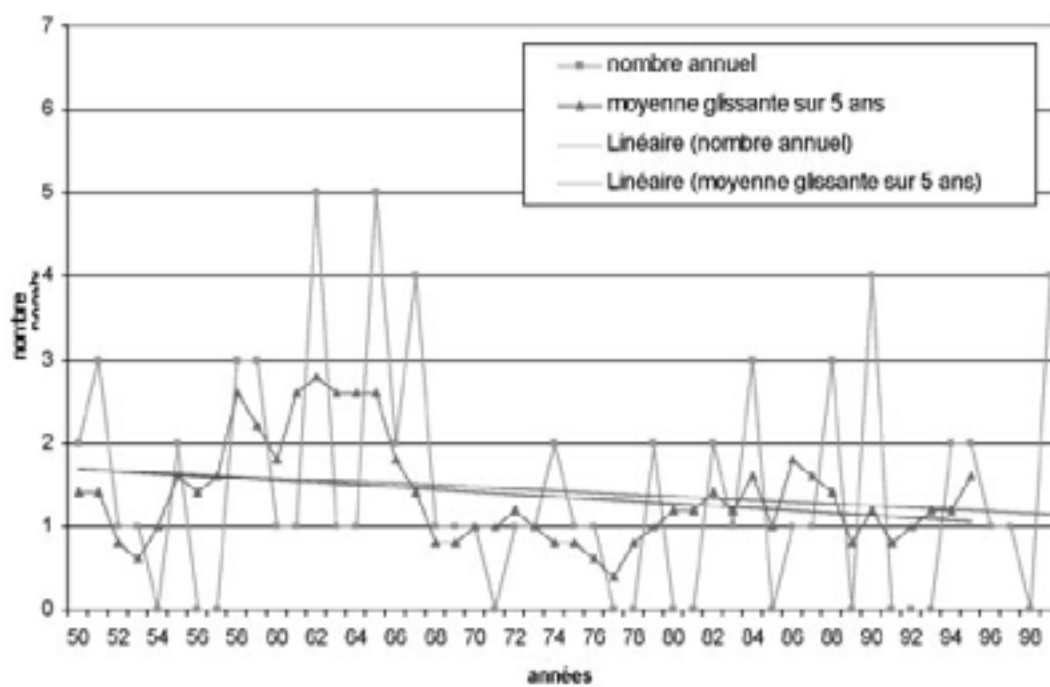


Figure I - 4 : Nombre de fortes tempêtes observées chaque année de 1950 à 1999 (d'après Drevetton (2002)).

Drevet (2002) a identifié 734 épisodes de vent fort sur la période 1950-1999 en utilisant des critères similaires à ceux des assureurs (i.e. en comptabilisant les périodes où au moins 5% d'un nombre donné de stations françaises ont enregistré un vent maximal journalier supérieur à 100 km.h⁻¹). Ces épisodes correspondent à une moyenne de 14,7 par an (Figure I - 3). L'auteur a isolé sur cette période 71 tempêtes, soit 1,4 par an en moyenne (Figure I - 4). Ce type d'événement climatique est donc fréquent en France au regard des durées de révolution pratiquées en sylviculture (plusieurs dizaines d'années) : un peuplement forestier a de fortes chances d'essuyer au moins une tempête et plusieurs forts coups de vent au cours de sa vie.

En 1976, la forêt landaise de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) a subi des pointes de vent de 133 km.h⁻¹ enregistrées à Bordeaux et de 140 km.h⁻¹ au Cap Ferret. Ces vitesses ne sont pas si rares : leur période de retour est en moyenne de trois ans. Plusieurs millions de pins ont été détruits. Cette destruction est liée moins à la vitesse maximale instantanée des vents qu'à la durée de la tempête et aux valeurs inhabituellement fortes atteintes par la vitesse moyenne des vents.

Le 7 février 1996, un nouveau coup de vent de courte durée sur le littoral Aquitain a détruit 1.5 millions de m³ de bois, entre le Médoc et Bayonne. Des vitesses instantanées de 176 km.h⁻¹ ont alors été enregistrées à Lège Cap-Ferret.

Ces manifestations climatiques sont donc fréquentes. Le danger pour les forêts françaises réside dans la combinaison [vitesse de vent extrême - vitesse de vent moyen importante - étendue et durée du phénomène].

I - 2.2 Les tempêtes des 26, 27 et 28 décembre 1999

Les tempêtes de décembre 1999 ont d'abord frappé le Danemark et la Suède les 3 et 4 décembre, puis la France, l'Allemagne et la Suisse les 25-26 et les 27-28 décembre, se déplaçant d'Est en Ouest. Ces cinq pays, ainsi que la Pologne, l'Autriche et la Lituanie, ont été les plus gravement touchés (source UNECE Timber Committee, European Forestry Commission). Les pointes maximales de vent enregistrées sont très importantes : 173 km.h⁻¹ à Paris Orly, 184 km.h⁻¹ à l'île d'Ouessant, plus de 200 km.h⁻¹ sur l'île de Ré (sources Météo-France). Bien qu'à certains endroits ces vitesses maximales battent les records connus, elles avaient déjà eu cours sur l'Europe. Outre la violence du vent, c'est la durée et surtout l'extension de ces tempêtes qui sont exceptionnelles. Quasiment l'ensemble du territoire français métropolitain a été atteint. La figure I - 5 compare respectivement Lothar (25-26 décembre) et Martin (27-28 décembre) à des tempêtes ayant sévit sur la même zone.

Une forte pluviométrie lors des mois précédents s'ajoute à ces vitesses de vent importantes, cette extension et cette durée. Dans la plupart des régions, la saturation en eau du sol a diminué la cohésion du sol, facilitant ainsi le déracinement des arbres.

En France, l'IFN a estimé les pertes forestières à 140 millions de m³ de bois, dont 26.1 millions pour les Landes et la Gironde, ce qui équivaut à 3.5 années de récolte sur le massif landais (IFN, communication du 4^{ième} inventaire actualisé pour les départements Landes et Gironde). Ces dégâts forestiers représentent la plus importante perte de bois depuis 1950. Globalement, l'Europe a perdu six mois d'exploitation. Le préjudice financier a été important pour les exploitants forestiers, l'industrie forestière et le marché du bois (source UNECE Timber Committee, European Forestry Commission).

Après les tempêtes, les exploitants forestiers se retrouvent face à une importante quantité de bois au sol : ce bois doit alors être exploité lorsque c'est possible, puis valorisé au mieux ou stocké. Les exploitants forestiers doivent aussi penser au nettoyage et au reboisement des parcelles atteintes, de façon économiquement viable. Au cours du mois de Janvier 2000, le Plan National Chablis a été lancé par le gouvernement français. Des subventions spéciales et des prêts à des conditions favorables ont été accordés afin de favoriser la récolte, le stockage et le transport des billes de bois abattu, en créant des pistes, des routes, des places de dépôts. Le déblaiement des routes et pistes forestières a été réalisé pour faciliter la mobilisation des chablis, afin de favoriser la régénération naturelle et réduire les risques d'incendie et les risques phytosanitaires (circulaires DERF/SDF/C2000 - 3001 et 3002 du 7 février 2000, C2000 - 3006 du 25 février 2000 par exemple). Des subventions ont également été accordées aux scieries afin de faire face à l'arrivée brutale de ces stocks importants, par exemple pour l'emploi d'ouvriers et l'achat de machines supplémentaires. Vers la fin de l'année 2000, environ la moitié des chablis avaient été retirés, la plupart du temps des peuplements les plus accessibles et les plus précieux. Le bois a été vendu à un prix n'excédant pas 80% de sa valeur habituelle. L'État s'est engagé à verser des indemnités, se montant à quelque 90 millions d'euros par an pour la période 2000-2009, aux communes et aux propriétaires privés pour les aider à dégager et à régénérer leurs forêts.

Suite à ces tempêtes, les États Européens ont initié une mobilisation des recherches vers la stabilité des forêts et des arbres, et la prise en compte de ce risque dans la gestion économique et le marché du bois. Une demande forte de recommandations s'est manifestée concernant l'établissement des forêts, les méthodes de reboisement et la gestion sylvicole appropriées pour réduire leur vulnérabilité au vent. En France, une expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts et leur reconstitution a été engagée par le GIP ECOSystèmes FORestiers (Gip Ecofor), et rédigée conjointement par l'INRA et le Cemagref (Collectif INRA-CEMAGREF 2000). Les changements sylvicoles préconisés actuellement en

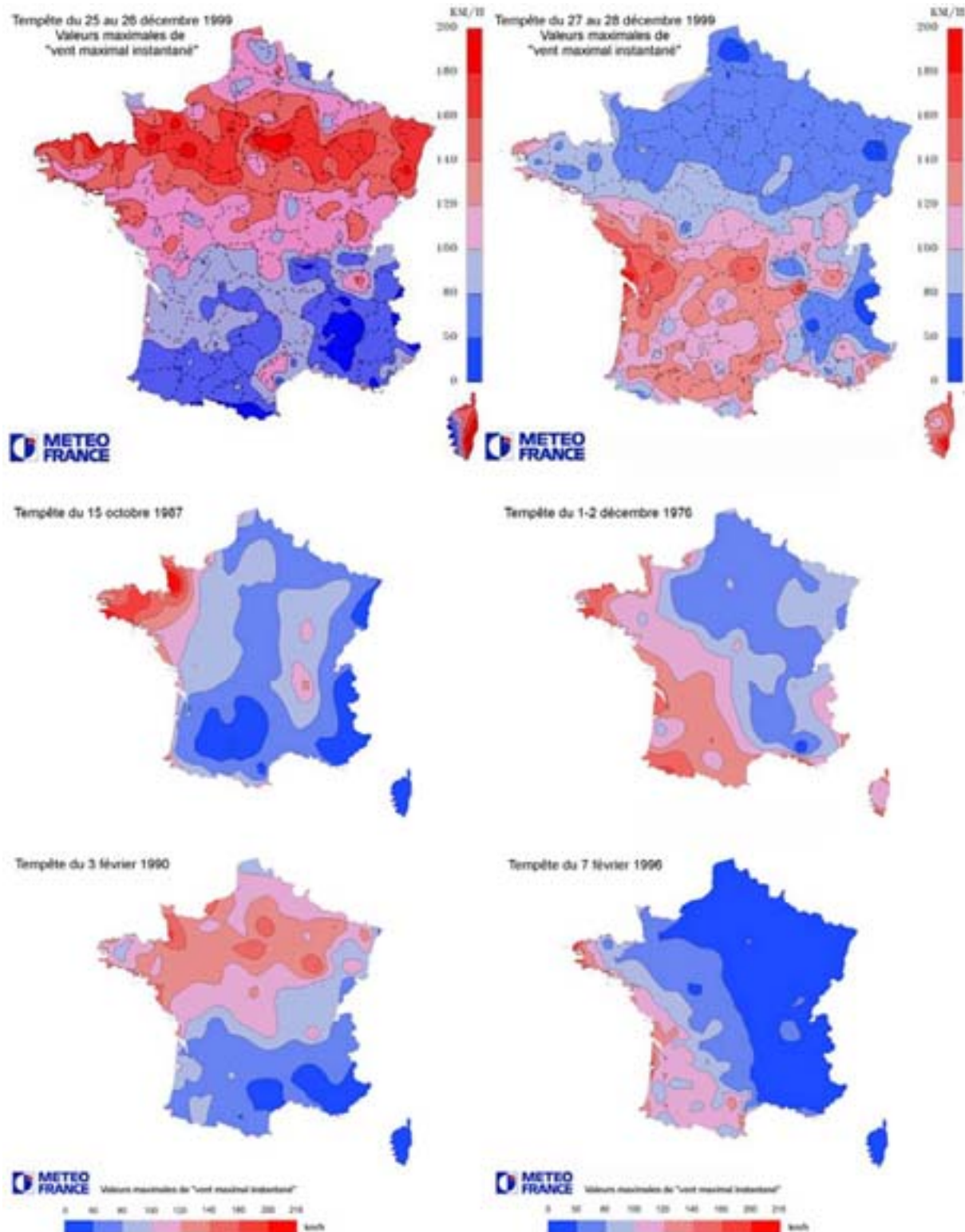


Figure I - 5 : Répartition des valeurs maximales de vent enregistrées les 25-26/12/1999 (nord de la France) et 27-28/12/1999 (sud de la France) par les stations météorologiques situées à moins de 500 m d'altitude. Comparaison avec les mêmes valeurs maximales enregistrées lors de deux autres tempêtes survenues en France avant 1999 dans les mêmes zones (images Météo-France).

France et à l'étranger induisent un recours accru à la régénération naturelle et une plus grande diversification des essences, notamment de feuillus.

I - 2.3 Evènements éoliens exceptionnels et changement climatique

Les tempêtes de fin 1999 ont relancé le débat concernant le rôle du réchauffement atmosphérique sur l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de tels évènements. D'après Serge Planton (Météo-France, Centre national de recherches météorologiques), "si le réchauffement du climat est d'ores et déjà avéré, les observations actuelles ne permettent pas de révéler une tendance séculaire à l'augmentation de la probabilité des tempêtes en France ou en Europe. De plus, s'il faut s'attendre à une amplification future du réchauffement climatique, il n'est pas possible à ce jour de dégager un consensus sur ce que nous réserve l'avenir concernant la fréquence ou l'intensité de ces tempêtes".

Le projet européen WASA (1998) - Waves and storms in the North Atlantic - montre une variation importante du nombre et de l'intensité des tempêtes sur l'Atlantique Nord au cours des 120 dernières années, qui ne permet pas de conclure sur l'évolution de ces évènements. Aucune tendance à l'augmentation ou à la diminution des tempêtes en France n'est significative. Des vitesses de vent moins importantes ont été enregistrées après 1970, mais cette diminution de vitesse est liée à un changement de type de capteur utilisé par Météo-France : les capteurs employés avant 1970 surestiment de 5 à 10% les vitesses par rapport aux capteurs actuels (Drevetton 2002).

Si les études menées actuellement ne permettent pas de conclure sur la modification de fréquence des tempêtes de façon globale, le réchauffement climatique pourra néanmoins avoir des conséquences sur la stabilité des forêts. D'après Peltola *et al.* (1999a), les peuplements de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) de Finlande auraient à souffrir de ce réchauffement : des précipitations plus importantes de 10 à 15% et un réchauffement de 2 à 4 °c (Kettunen *et al.* 1988), ainsi qu'une fréquence accrue des vents extrêmes durant la période de dégel (Solantie 1986), provoqueraient des chablis plus fréquents. Les simulations montrent que des vents entre 11 et 15 m.s⁻¹ seraient alors suffisants pour déraciner un pin. Ces vents arriveraient selon les prévisions sur 80% de la période de dégel, alors qu'ils ne sont présents que durant 55% de cette période actuellement. Ils sont inférieurs à ceux nécessaires pour ruiner un Pin sylvestre dans des conditions où le sol est gelé (Peltola *et al.* 2000).

I - 3 Contexte général

I - 3.1 Les enjeux liés à la forêt française et le cas du massif landais

En France, la forêt couvre actuellement 25% du territoire. La superficie totale des boisements atteint 15 millions d'ha. Une telle surface n'avait pas été constatée depuis le XV^{ème} siècle. En effet, le patrimoine forestier français s'accroît régulièrement depuis 150 ans, remplaçant notamment les prairies cultivées. L'IFN estime actuellement l'augmentation de cette superficie à 50 000 ha par an. 71% de cette surface forestière est privée. L'état actuel des surfaces forestières françaises reflète la politique européenne, qui favorise le développement sylvicole, entraînant une augmentation de 10% du couvert forestier entre 1960 et 1990. Mais, si en Europe le couvert forestier augmente, ce n'est pas le cas général sur l'ensemble du globe : au cours des 50 dernières années, le couvert forestier mondial a diminué de moitié (Bellone 1989, SOFO 2003).

La notion de risque pour la forêt en France se justifie pleinement. En effet, le traité des eaux et forêts instauré par Louis XIV a changé la façon d'envisager la forêt française : à partir de cette date, elle constitue une ressource stratégique à gérer. Ses fonctions sont économiques, sociales, environnementales (écologiques). En France, elle représente un patrimoine : on parle d'ailleurs d'"usagers" de la forêt. L'intervention humaine sur la forêt a été, pendant longtemps, associée à sa destruction, mais actuellement sa gestion implique sa stabilisation et sa valorisation. Le but est alors d'améliorer les conditions de production tout en préservant les écosystèmes.

Les dégâts forestiers dus au vent en France se sont aggravés depuis le XVIII^{ème} siècle, aggravation liée à l'évolution de cette forêt. D'après le document Collectif INRA-CEMAGREF (2000), les facteurs suivants expliquent cette augmentation du volume de dégâts :

- l'augmentation de la superficie des forêts,
- l'augmentation du volume sur pied à l'hectare,
- le remplacement de taillis (relativement stables au vent) et de taillis sous futaie par de hautes futaies,
- l'augmentation de la hauteur des peuplements,
- la plantation accrue de conifères qui, en hiver, saison à laquelle les vents sont les plus forts en Europe, sont plus sensibles au vent que les feuillus.

L'existence de la forêt par l'action anthropique prend tout son sens pour le massif landais de Pin maritime. Au XVII^{ème} siècle, le massif représentait environ 100 000 ha de boisements morcelés. Puis, entre 1810 et 1865, la forêt littorale a été développée par les habitants de façon à fixer les dunes de la côte atlantique, le sable gagnant du terrain : en 1867, 90 000 ha de dunes étaient plantés en Pin maritime. Parallèlement, la pratique du drainage est initiée dans le but d'assainir et d'ensemencer les terres. Napoléon III, ayant constaté le succès de cette pratique, proclame la loi du 19 juin 1857 : il s'agit d'un plan général de mise en culture, qui oblige les paysans landais à valoriser leurs terres en plantant du Pin maritime, ou à les vendre. En 1875, le massif atteignait 600 000 ha. La forêt landaise s'est donc considérablement étendue, au détriment des grandes superficies de lande marécageuse. Actuellement, les peuplements monospécifiques de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) occupent 897 000 ha, soit 77% des 1 166 000 ha de la forêt de Gascogne, ce qui fait d'elle la plus grande forêt artificielle d'Europe. Les 269 000 ha restants sont constitués de la zone littorale de protection et d'une centaine de milliers d'ha de chênes et d'essences diverses. La forêt landaise représente 16% de la production de bois française.

Le Pin maritime est l'un des conifères, ou résineux, les plus importants en France, occupant plus de 10% de la surface boisée (source IFN). C'est une essence pionnière héliophile, qui s'accommode des sols pauvres, mais est exigeante en lumière, en chaleur et en humidité atmosphérique (Riou-Nivert 2001). Sa croissance est rapide, sa longévité faible. En théorie, elle atteint 200 ans, mais en pratique elle oscille entre 80 et 100 ans (Jacamon 2001). Le Pin maritime atteint 20 à 30 m de hauteur, ce qui est relativement faible comparé aux autres essences introduites ou non en France, telles que le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), le Sapin pectiné (*Abies alba*) ou l'Epicéa commun (*Picea abies*), qui atteignent plutôt 40 à 50 m de hauteur. Le Pin maritime du massif landais est essentiellement de la race atlantique. Elle supporte mieux que la provenance méditerranéenne (Pin maritime mésogéen) les conditions climatiques et pédologiques des landes de Gascogne : sécheresse estivale, ennoyage hivernal, gel léger (Riou-Nivert 2001). Mais elle est associée à une forte flexuosité du tronc et une plasticité de forme importante (Fourcaud 1999). Son système racinaire est qualifié de "profond et traçant à la fois" (Jacamon 2001, Riou-Nivert 2001). En terme de sylviculture, le Pin maritime est utilisé en Aquitaine pour la production de bois (Figure I - 6). La révolution est d'environ 40 à 50 ans, 30 ans sur les stations les plus fertiles (Maugé 1987). La plantation est la méthode de renouvellement des parcelles la plus employée actuellement. La conduite sylvicole est généralement dynamique, le sylviculteur intervenant souvent dans son peuplement (Maugé 1987, AFOCEL 1994). Elle est sans cesse en évolution, d'où une difficulté d'étude car il existe souvent un décalage entre les facteurs

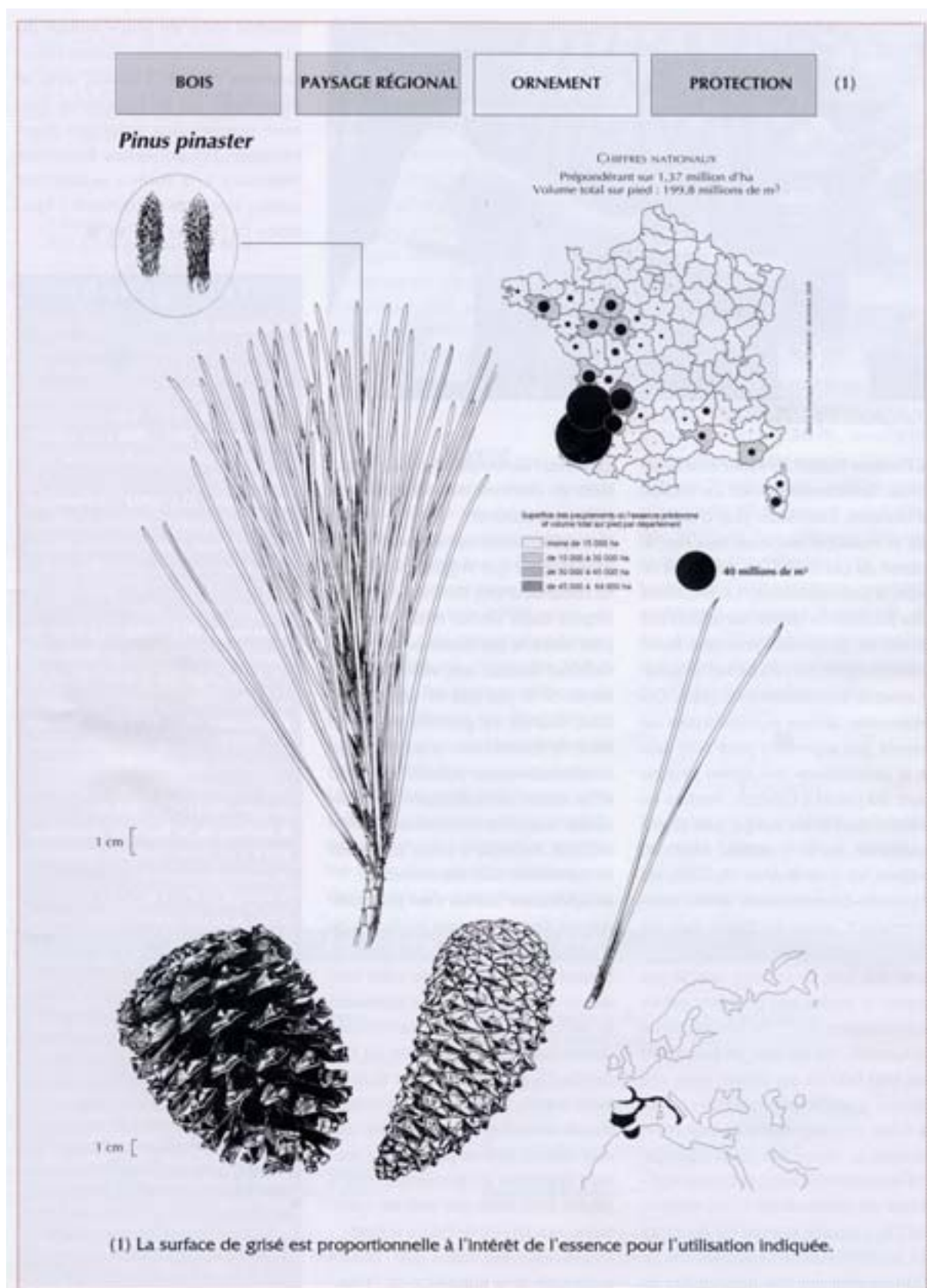


Figure I - 6 : Importance du Pin maritime dans la filière bois Aquitaine. Figure extraite de la fiche de l'essence éditée dans "Les résineux", P. Riou-Nivert, Institut pour le Développement Forestier.

étudiés, et les conditions actuelles sur lesquelles aucun recul n'est possible. C'est notamment le cas des modes d'élevage des jeunes plants.

Le choix du massif landais dans le cadre de cette étude a été dicté par plusieurs points. Tout d'abord, la façade atlantique est considérée comme une zone à risque concernant le vent, avec un retour de moins de 5 ans pour des vitesses de vent de 120 km.h^{-1} (Collectif INRA-CEMAGREF 2000). Ensuite, il présente l'avantage, pour des études de stabilité, d'être constitué de peuplements majoritairement monospécifiques, et la plupart du temps équiennes. Enfin, la prédiction du risque de vent prend une importance particulière étant donné l'importance économique de la filière bois Aquitaine, et les dégâts provoqués par la tempête de 1999.

1 - 3.2 Impact des conduites sylvicoles sur la résistance au vent des peuplements

Les facteurs de résistance de l'arbre face à la charge physique du vent, tels qu'exposés précédemment, sont influencés par des processus se déroulant à plusieurs échelles, de l'arbre à l'environnement global du peuplement. La figure I - 7 schématise les principales interactions qui régissent ces facteurs. La sylviculture joue un rôle important, en modifiant la charge elle-même au travers de l'écoulement du vent, et en influençant la structure des unités qui réceptionnent ce vent, c'est-à-dire le peuplement et les arbres de façon individuelle. Les actions sylvicoles agissent également sur l'environnement de la parcelle considérée (caractéristiques du sol, par exemple par drainage, géométrie et exposition par la gestion des parcelles voisines).

La sylviculture du Pin maritime dans les Landes de Gascogne est de type intensif, tournée vers la production de bois. Les interventions sylvicoles sont fréquentes, les éclaircies ont lieu tous les cinq ans. Maugé (1987) présente un scénario sylvicole classique appliqué au Pin maritime sur une révolution de 45 ans, avec 2 dépressages et 4 éclaircies avant la coupe rase. Les éclaircies se font "par le bas". L'élagage est préconisé 2 à 3 fois avant la seconde éclaircie. Selon le type de station sur lequel se fait l'installation - lande humide, lande mésophile ou lande sèche pour les principales - les recommandations sylvicoles sont différentes : la préparation de la parcelle avant reboisement intégrera drainage, débroussaillage mécanique, fertilisation initiale phosphatée et travail du sol en lande humide, tandis que seul un débroussaillage et un travail du sol sont recommandés en lande sèche. Sur les stations fertiles telles que lande humide et mésophile, la plantation de

variétés améliorées est conseillée, sur lande sèche, c'est plutôt le semis direct qui sera pratiqué. Le contrôle de la végétation adventice se fait de façon mécanique (AFOCEL 1994).

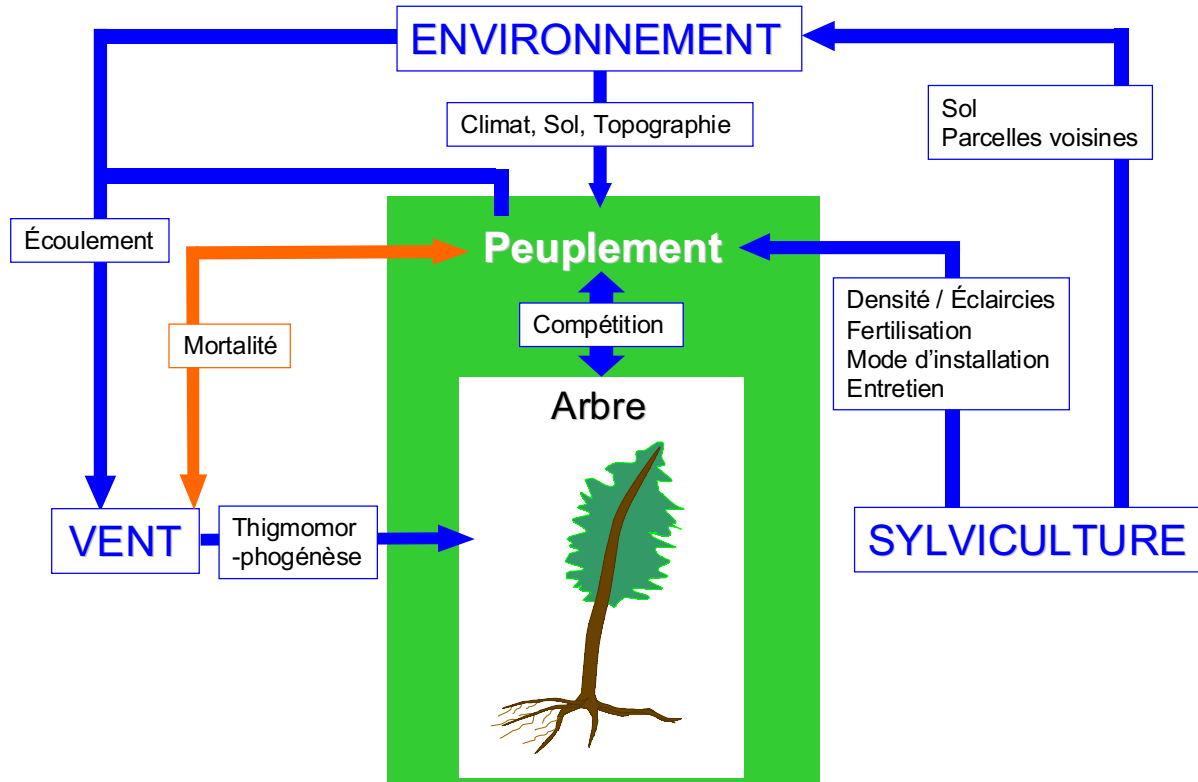


Figure I - 7 : Schéma représentant les principales interactions agissant sur les facteurs de stabilité du peuplement, aux échelles de l'arbre, du peuplement et de son environnement. Ces interactions se placent dans le cas d'un peuplement monospécifique équienné géré de façon intensive, tel que pour le Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Les flèches bleues représentent des interactions se déroulant au cours de la vie du peuplement. Les flèches oranges représente l'action ponctuelle des vents de type tempête (mortalité brutale et trouées engendrant des dégâts croissants).

Le coefficient de forme de la tige (Hauteur totale de l'arbre sur Diamètre à 1.30 m) est un indicateur important de la stabilité individuelle (Petty et Worrell 1981, Cremer *et al.* 1982, Putz *et al.* 1983, Petty et Swain 1985). L'augmentation de la densité de peuplement diminue le diamètre de la tige mais influence peu la hauteur chez *Pinus pinaster* Ait. (Lemoine 1980). Le coefficient de forme augmente donc, ce qui diminue la stabilité individuelle.

Les variations morphologiques de la couronne influencent la force appliquée sur l'arbre par le vent. Mayhead (1973) a déterminé en soufflerie le coefficient de traînée pour diverses essences de conifères, mais a constaté une forte variabilité attribuée à ces variations. De plus, d'après Zhu *et al.* (2000), le profil horizontal de vent dans la couronne de *Pinus thunbergii* est influencé par l'épaisseur de la couronne de l'arbre. Chez *Pinus pinaster*,

plusieurs facteurs influencent la morphologie de la couronne : i) d'après Lemoine (1980), l'augmentation de densité diminue l'étalement du houppier via la compétition intra-spécifique, ii) la forme et les dimensions du houppier de chaque individu sont dépendantes de l'orientation de l'arbre par rapport au soleil (Rouvinen et Kuuluvainen (1997) sur *Pinus sylvestris*), or le Pin maritime est une espèce héliophile, iii) l'élagage, artificiel ou naturel, réduit la surface frontale exposée au vent. Or, Hedden *et al.* (1995), en simulant par un modèle mathématique la réaction des arbres à des vents moyens d'ouragan (164 km.h^{-1}), a montré qu'une perte supérieure ou égale à 25% de la surface frontale de houppier est le critère de diminution de dégât le plus important devant la flexion de la tige, le profilage des branches et la diminution de 10% de la cime. L'asymétrie du houppier est également un facteur à prendre en compte pour expliquer la casse de la tige liée à la charge du vent (Skatter et Kucera 2000). Cette asymétrie et l'inclinaison de la tige par rapport à la verticale, impliquant un stress statique gravitationnel, peuvent être à l'origine d'un taux de bois de compression plus important (Telewski 1995). Dunham et Cameron (2000) ont trouvé chez des épicéas de Sitka ayant cassé un plus fort taux de bois de compression, un houppier plus petit en surface, un bois plus dense et moins élastique. La qualité du bois influence donc le type de dégât : la fragilisation mécanique de la tige favorise la casse de l'arbre plutôt que le déracinement. Or la sylviculture, en jouant sur la compétition, influence la qualité de ce bois, par exemple en terme de taille des nœuds.

La densité de peuplement agit sur la résistance au vent à l'échelle individuelle en influençant la morphologie des pins, mais aussi à l'échelle du peuplement. Cette densité détermine en premier lieu la pénétration du vent dans le peuplement. Ensuite, lorsque la densité est suffisante pour obtenir une fermeture du couvert, le contact entre houppiers permet un amortissement dissipant l'énergie transmise par le vent, de 0 à 40% chez *Picea sitchensis* d'après Blackburn *et al.* (1988). Milne (1991) montre que l'amortissement de l'oscillation de la tige en conditions dynamiques a trois composantes : i) l'interférence entre branches d'arbres voisins, ii) l'amortissement aérodynamique lié aux feuilles, iii) l'amortissement dû à la tige (MOE/MOR) et aux racines. Ces trois éléments comptent pour 5/4/1 dans le cas d'un arbre moyen sur un peuplement de *Picea sitchensis* à 3800 tiges par hectare.

Le mode d'installation du peuplement peut avoir un impact sur la stabilité, notamment dans le cas de plantation de plants élevés en conteneurs. Le type de conteneur peut altérer le développement du système racinaire (Sundström et Keane 1999). Des problèmes de stabilité dus aux conteneurs ont été relevés en Suède dans les années 70. L'instabilité s'est surtout manifestée chez *Pinus contorta* Dougl. et *Pinus sylvestris* L. (Rune et Warensjo

2002). Sur *Pinus pinaster* Ait., une étude de stabilité liée au type de conteneur suite à la tempête de 1999 a été réalisée (Najar 2002). Elle a montré, comme les études précédentes, que le type de conteneur dans lequel sont élevés les plants de Pin maritime influence l'architecture et la vigueur du système racinaire se développant après plantation. Néanmoins, les conditions de culture en pépinière et le mode et la période de plantation influencent également la qualité de l'ancrage. Pour ces raisons, aucune tendance significative sur la stabilité au vent des peuplements étudiés n'a pu être dégagée. Enfin, Lindstrom et Rune (1999) ont démontré une meilleure résistance à la traction des racines de *Pinus sylvestris* semés par rapport aux individus élevés en pot. Le drainage en lande humide favorise le développement racinaire en profondeur des pins (AFOCEL 1994). Fraser (1962) a montré sur *Picea sitchensis* et *Pseudotsuga taxifolia* que pour des individus de même poids de tige, la résistance à l'arrachage augmente fortement avec la profondeur d'enracinement. Sur des sols drainés, cette augmentation de résistance atteint 25%. Le labour profond permet également de casser en partie l'horizon aliosique induré qui bloque la croissance verticale des racines. Enfin, le mode d'entretien influence la stabilité : un travail du sol trop profond endommage les racines superficielles des arbres.

Le Pin maritime peut répondre au stress externe induit par le vent en produisant, au niveau des racines sous le vent, du bois présentant des propriétés mécaniques similaires à celles du bois de compression (Stokes 1999). Nicoll et Ray (1996) ont trouvé sur les Epicéas de Sitka de 46 ans une plus grande rigidité en compression des racines sous le vent, due à une augmentation de la croissance sur la face supérieure des racines. Au vent, les racines développent également une excentricité de croissance qui les fait ressembler en forme aux poutres en **I** ou en **T** (Figure I - 8), ce qui leur permet une meilleure résistance en flexion verticale. Cette excentricité est maximale à 0.75 m de la tige. Chez *Pinus pinaster* Ait., les études de Stokes *et al.* (1998) et Stokes (1999) laissent penser que les pins soumis aux vents dominants de façon régulière développent une croissance adaptative au niveau racinaire, leur permettant de mieux résister aux charges induites par le vent. Une éclaircie expose donc brusquement au vent des arbres "inadaptés" à ce stress. De plus, la charge du vent sur les arbres augmente : la pénétration du vent au sein du peuplement est meilleure, la rugosité du couvert s'accroît, augmentant la force d'attaque du vent. Le couvert s'ouvrant, l'amortissement lié au contact entre houppiers voisins est diminué. Tout ces facteurs induisent un transfert d'énergie plus important au système racinaire. Le peuplement retrouve une certaine stabilité au bout de quelques années, lorsque les arbres se sont adaptés à leur nouvel environnement, et que le couvert s'est refermé. Cependant, cette réaction est

d'autant plus lente que le peuplement est âgé et que l'éclaircie est importante (Nielsen 1995).

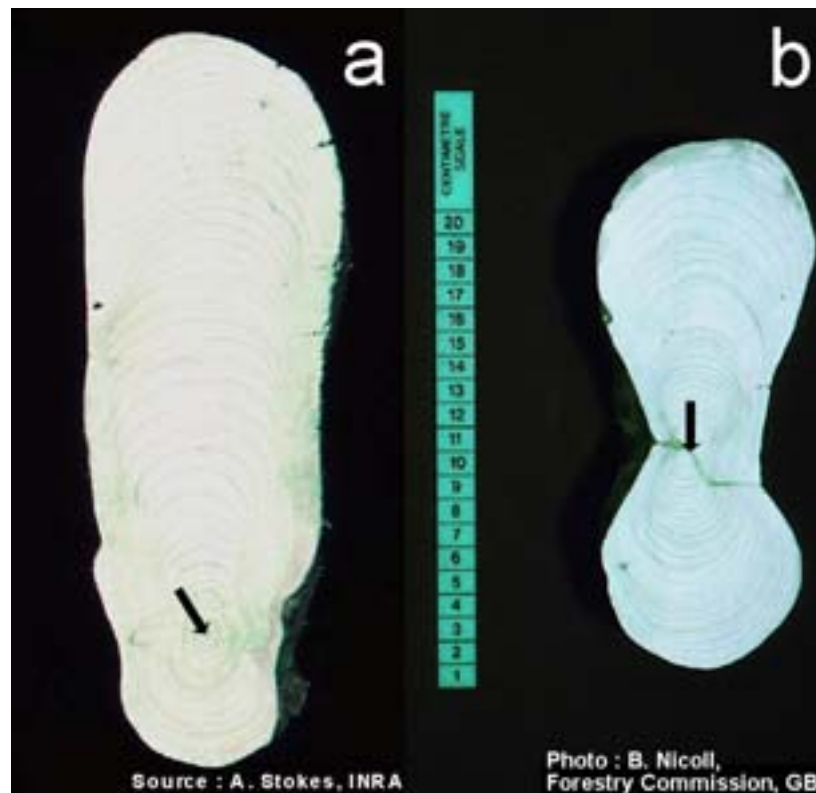


Figure I - 8 : Coupes transversales de racines d'Epicéa de Sitka sous le vent ayant développé une croissance excentrée. La flèche indique le centre biologique de la racine ; racine a) en **T**, b) en **I**.

I - 3.3 Cadre et présentation de la thèse

A contrario de l'Angleterre, du Canada ou de la Nouvelle-Zélande, où les pertes liées au vent sont fréquentes, les études de stabilité de l'arbre en France sont de développement récent. Nombre d'observations ont été faites de façon historique sur des dégâts liés au vent mais les réelles études expérimentales et de modélisations de la sensibilité ne datent que de quelques années. Les modèles de prédiction du risque de vent en forêt à l'échelle du peuplement adaptés aux forêts françaises sont actuellement quasi-inexistants. Ce travail de thèse traite des facteurs influençant la sensibilité au vent des peuplements monospécifiques équiennes de Pin maritime, cultivés dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne. Il s'inscrit dans un contexte pluridisciplinaire, de la biomécanique de l'arbre à la sylviculture. Il tente de faire le lien entre les travaux effectués par le Laboratoire de Rhéologie du Bois de

Bordeaux sur la mécanique d'ancrage appliquée au Pin maritime, et les systèmes d'étude et de gestion sylvicoles, pour la prise en compte de la stabilité au vent des peuplements.

L'objectif de cette thèse est de dégager des pistes sur la compréhension des facteurs principaux influençant la sensibilité au vent des peuplements de Pin maritime, dont l'une des finalités est d'apporter aux gestionnaires des éléments d'aide par rapport au risque de vent.

Nos questions étaient les suivantes : la gestion sylvicole, notamment la gestion de la densité et la fertilisation, les conditions de sol présentent sur le massif, et l'exposition aux vents dominants ont-elles une influence sur la résistance au vent du Pin maritime en peuplement?

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur trois approches complémentaires :

- l'analyse de l'influence de certains facteurs sylvicoles sur la résistance de parcelles expérimentales par comparaison de dégâts de tempête ;
- l'étude expérimentale de l'ancrage du Pin maritime dans les différentes conditions de sol rencontrées sur le massif landais, et l'exposition aux vents dominants, et l'influence de ces conditions sur la qualité de l'ancrage ;
- l'adaptation et l'utilisation d'un modèle existant de prédiction de vitesses de vent critiques, basé sur des relations mécanistes et empiriques, pour *Pinus pinaster* Ait.

Ces études se sont déroulées au sein du LRBB et de l'Unité de Recherches Forestières de l'INRA de Bordeaux, nouvellement Unité EPHYSE.

La thèse s'articule autour de trois publications, correspondant respectivement aux trois approches présentées plus haut. Chaque article est accompagné de résultats complémentaires et d'une réflexion synthétique sur l'étude réalisée. Ces trois parties sont suivies d'une conclusion générale, débouchant sur des perspectives concernant la modélisation du risque et sa prise en compte dans la gestion des forêts cultivées.

Chapitre II

Observation des dégâts dus au vent

Ce chapitre présente une étude comparative des dégâts observés sur deux dispositifs expérimentaux suite à la tempête passée sur l'Ouest de la France le 27 décembre 1999. Ces parcelles expérimentales avaient été installées initialement pour étudier l'effet de différents facteurs sur la croissance du Pin maritime : l'intensité d'éclaircie, le travail du sol et la fertilisation phosphatée pour le dispositif "Saint Alban", les effets conjugués de la densité de peuplement et de l'amélioration génétique de première génération pour le dispositif "parcelle U". L'article est suivi d'une présentation de quelques résultats complémentaires, intégrés dans une réflexion sur les processus par lesquels les aménagements sylvicoles influencent la résistance au vent des peuplements forestiers équiennes.



Peuplement de Bilos (33) détruit par la tempête de 1999, installé en lande humide.
Pins de 50 ans. Photo prise en mars 2000.

Sommaire
- Chapitre II -
Observation des dégâts dus au vent

II - 1	Résistance au vent de peuplements de Pin maritime dans le Sud-Ouest de la France. Influence de la densité, de la fertilisation et de l'amélioration génétique sur deux dispositifs endommagés par la tempête du 27 décembre 1999 - Article paru dans <i>Annals of Forest Science</i>	32
II - 2	Influence de la gestion sylvicole sur la sensibilité au vent des peuplements forestiers monospécifiques et équiennes	33
II - 2.1	Observations complémentaires sur les dégâts	33
II - 2.2	Indications sur les caractéristiques pédologiques du dispositif "Saint Alban"	34
II - 2.3	La densité et la stabilité au vent des peuplements	35
II - 2.4	L'influence de la position sociale de l'arbre sur l'endommagement	37
II - 2.5	La fertilisation et l'amélioration génétique	39
II - 2.6	Conclusion	40

II - 1 Résistance au vent de peuplements de Pin maritime dans le Sud-Ouest de la France. Influence de la densité, de la fertilisation et de l'amélioration génétique sur deux dispositifs endommagés par la tempête du 27 décembre 1999 - Article paru dans *Annals of Forest Science*

Résumé de l'article Les peuplements de *Pinus pinaster* en Aquitaine sont économiquement très importants mais exposés aux tempêtes océaniques. Dans la région de Bordeaux, deux dispositifs de 20 et 51 ans peu éloignés ont permis d'étudier l'influence de la sylviculture sur la résistance au vent lors de la tempête de 1999. La densité est le facteur sylvicole qui influence le plus les caractéristiques des peuplements. Quand la densité augmente, la circonférence moyenne diminue notablement et la hauteur moyenne a tendance à augmenter. Les chablis étaient moins abondants et les pins penchés plus nombreux dans les peuplements denses. Pour les densités pratiquées en forêt de production, i) l'amélioration génétique n'a pas augmenté l'intensité des dégâts dans l'essai de 20 ans, et la fertilisation au phosphore a réduit le taux de chablis sur l'essai de 51 ans ; ii) par rapport aux pins intacts, les chablis ont une circonférence inférieure de 3.6 cm, une longueur relative de houppier plus courte de 10% et un coefficient d'élancement du tronc plus fort. Ces caractéristiques peuvent traduire la diminution des capacités d'amortissement du balancement des arbres lors des bourrasques.

Ces recherches ont montré que la résistance au vent est meilleure dans les peuplements homogènes en hauteur, circonférence ou longueur de houppier. Un couvert plus fermé semble améliorer la résistance au vent en augmentant l'amortissement des oscillations des houppiers par contact entre houppiers, ainsi que le rapport entre les parties aériennes et les racines.

Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm

Véronique Cucchi and Didier Bert*

Laboratoire Croissance et Production, Unité de Recherches Forestières de Pierroton, Institut National de la Recherche Agronomique – Bordeaux, 69 Route d'Arcachon, 33612 Cestas Cedex, France

(Received 10 October 2001; accepted 12 August 2002)

Abstract – Maritime pine (*Pinus pinaster*) stands in the Aquitaine region are of great economic importance but subject to Atlantic storms. In the Bordeaux region, two experimental sites located near each other, aged 20 and 51 years, made it possible to study the effects of different types of silviculture on wind-firmness during the 1999 storm. Stand density has a major influence on tree growth. When density increases, height increases and circumference decreases appreciably. In the dense stands, windthrown trees were less abundant and there were more leaning pines. With respect to other silvicultural factors in stands planted at typical densities: (i) genetic breeding did not increase damage intensity at the 20-year-old experimental site and phosphorus fertilisation decreased the windthrow at the 51-year-old experimental site; (ii) compared to the undamaged trees, the circumference of windthrown trees was 3.6 cm smaller, the relative crown length was 10% shorter and the stem taper coefficient was higher. This research has shown that wind-firmness is better in stands where the height, circumference and crown length are homogeneous. A more closed canopy seems to improve wind resistance by increasing the damping effect of swaying as a result of the crowns being in contact with each other and provides a more favourable ratio between the aerial parts and the roots.

windthrow / silviculture / *Pinus pinaster* / stability / storm

Résumé – Résistance au vent de peuplements de pin maritime dans le sud-ouest de la France. Influence de la densité, de la fertilisation et de l'amélioration génétique sur deux dispositifs endommagés lors de la tempête du 27 décembre 1999. Les peuplements de *Pinus pinaster* en Aquitaine sont économiquement très importants mais exposés aux tempêtes océaniques. Dans la région de Bordeaux, deux dispositifs de 20 et 51 ans peu éloignés ont permis d'étudier l'influence de la sylviculture sur la résistance au vent lors de la tempête de 1999. La densité est le facteur sylvicole le plus influent sur les caractéristiques des peuplements. Quand la densité augmente, la circonférence moyenne diminue notablement et la hauteur moyenne a tendance à augmenter. Les chablis étaient moins abondants et les pins penchés plus nombreux dans les peuplements denses. Pour les densités pratiquées en forêt de production : (i) l'amélioration génétique n'a pas augmenté l'intensité des dégâts dans l'essai de 20 ans, et la fertilisation au phosphore a réduit le taux de chablis sur l'essai de 51 ans ; (ii) par rapport aux pins intacts, les chablis ont une circonférence inférieure de 3,6 cm, une longueur relative de houppier plus courte de 10 % et un coefficient d'élancement du tronc plus fort. Ces caractéristiques peuvent traduire la diminution des capacités d'amortissement du balancement des arbres lors des bourrasques. Ces recherches ont montré que la résistance au vent est meilleure dans les peuplements homogènes en hauteur, circonférence ou longueur de houppier. Un couvert plus fermé semble améliorer la résistance au vent en augmentant l'amortissement des oscillations des houppiers par contact entre houppiers, ainsi que le rapport entre les parties aériennes et les racines.

chablis / sylviculture / *Pinus pinaster* / stabilité / vent

1. INTRODUCTION

Intensive Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) cultivation in the Aquitaine region is vital to the French wood-based sector. The Landes region produces 16% of the wood in France even though it only covers 7% of French forestland. The most violent storm known since this cultivated forest was established occurred in the southwest of France on the 27th December 1999. Winds of over 170 km h⁻¹ devastated the north of the range and caused estimated losses of 26.1 million m³ of

wood, i.e. 19% of standing volume and 3.5 years of harvest (IFN, communication from the updated 4th Gironde and Landes inventory). This recent and considerable damage followed earlier and less severe damage of 1–2 December 1976 (2 million m³ of windthrow), 7 February 1996 (1.5 million m³ of windthrow) [16, 25].

Yet little research on vulnerability to wind has so far been conducted on species of commercial importance in France. Previous studies have focused mainly on broad-leaved trees or on conifers other than Maritime pine. Studies on *Abies alba*

* Correspondence and reprints
Tel.: (33) 05 57 12 28 44; fax: (33) 05 56 68 02 23; e-mail: bert@pierroton.inra.fr

Table I. Main features of the experiments. DBH and C130 are diameter and circumference at breast height, respectively. The complete height inventory for the 20-year-old stand was not available and the mean height is indicative.

		Experiment		
Age	20 years old		51 years old	
Name	U plot of Pierroton		Saint-Alban trial	
Number of plots	16		48	
Plot area (ha)	0.12		0.23	
Trees ha ⁻¹	600, 1950		185, 310, 426, 624	
Treatments	Number of blocs	2	Number of blocs	6
	Genetic types	Natural, improved	Fertilization	Control, P fertilized
	Spacing	2 × 2 m, 4 × 4 m	Thinning intensity at 21 yr-old	Light, heavy
			Thinning intensity at 25 yr-old	Light, heavy
Replicates per treatment	4		6	
Mean height (m)	≈ 16		23.8	
Mean DBH (m)	0.22		0.37	
Mean C130 (m)	0.70		1.17	

(Mill.), *Picea abies* (L.) Karst, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco and *Larix decidua* (Mill.) in France [15, 43] have shown that vulnerability depends partly on the species and mainly on the site conditions and silvicultural context. Therefore, more knowledge of wind-firmness in Maritime pine forests in the Aquitaine region is necessary, particularly considering that the range was affected by three storms in 23 years.

Wind-firmness in forests should be dealt with at various scales. At the regional scale, stand stability depends on abiotic factors such as climatic conditions, site topography and type of substrate [7, 32, 46]. At the local scale, wind-firmness cannot be dissociated from the stand and the individual tree properties. The overturning moment of a tree has two main components: the lateral force applied by the wind loading on the crown, and the displaced weight of the stem and the crown when the tree bends [19, 41]. There are also two main resistive forces: the root anchorage and the damping due to the contact between crowns and stem strength [41]. These four components are subject to modification under the influence of silvicultural practices. The management and spatial structure of the stand determine dimensional features and tree morphology [1, 10, 11, 40, 45, 48], wind permeability [21, 26, 41, 51] and mechanical properties of the wood influenced by exposition to wind [20, 53, 54]. Wind-firmness of individual trees also depends on external or internal defects due to insects or fungi [47]. Silvicultural factors and situations vary greatly in commercial stands and it is difficult to distinguish between the ways in which they interact with wind. It was therefore very interesting to study two experimental sites damaged by the 1999 storm in which several silvicultural conditions varied according to well known experimental protocols.

The two stands of Maritime pine were not far from each other and complementary to each other in terms of silvicultural history and age. The silvicultural treatments applied differed by their initial density, thinning regimes, fertilisation and genetic improvement. These treatments partly represented the older as well as the more current practices used in forestry in the Landes region. Their stand densities span the normal density, which makes it possible to generalise the results to more varied conditions. These experimental sites also had the

advantage of including replications and of having a spatial structure which made it possible to quantify and distinguish between the effects of the silvicultural factors on wind-firmness. Our approach was based on making observations at the stand scale and individual tree scale. We drew links between the various kinds of damage, on the one hand, and the silvicultural treatments and dendrometric features, on the other, with a view to answering the following questions:

- How do the various treatments affect the dendrometric features of the stands?
- How is the damage distributed with respect to the silvicultural treatments?
- Which dendrometric variables at the stand scale can best explain the level of damage?
- Are there dendrometric differences between the undamaged pines and the pines damaged by the storm?

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. The storm of December 1999: climatic data (Météo-France <http://www.meteo.fr>)

The two storms that swept through France on the 26th and 27th December 1999 moved from west to east at a speed of 100 km h⁻¹. The first storm mainly hit the north of France, with peaks of 200 km h⁻¹. At Cap-Ferret, 50 km to the west of the study sites, gusts of 173 km h⁻¹ at a height of 30 m were measured and 160 km h⁻¹ at a height of 20 m. The second storm occurred farther to the south, and the maximal wind speeds at Cap-Ferret once again reached 173 km h⁻¹ at a height of 30 m, and 144 km h⁻¹ at 10 m at the weather station at Bordeaux-Mérignac airport. Considering the strength of these winds, such an event tends to occur in this temperate European climate less than once a century.

2.2. Study sites: presentation and background

The two INRA experimental trials were located in the south-west of France, 25 km from Bordeaux, at 44.42° north latitude, 0.46° west longitude and at an altitude of 60 m (figure 1). The sites were 4 km apart and established with a view to estimating Maritime pine growth using various silvicultural methods (table 1) [29]. The relief is flat and

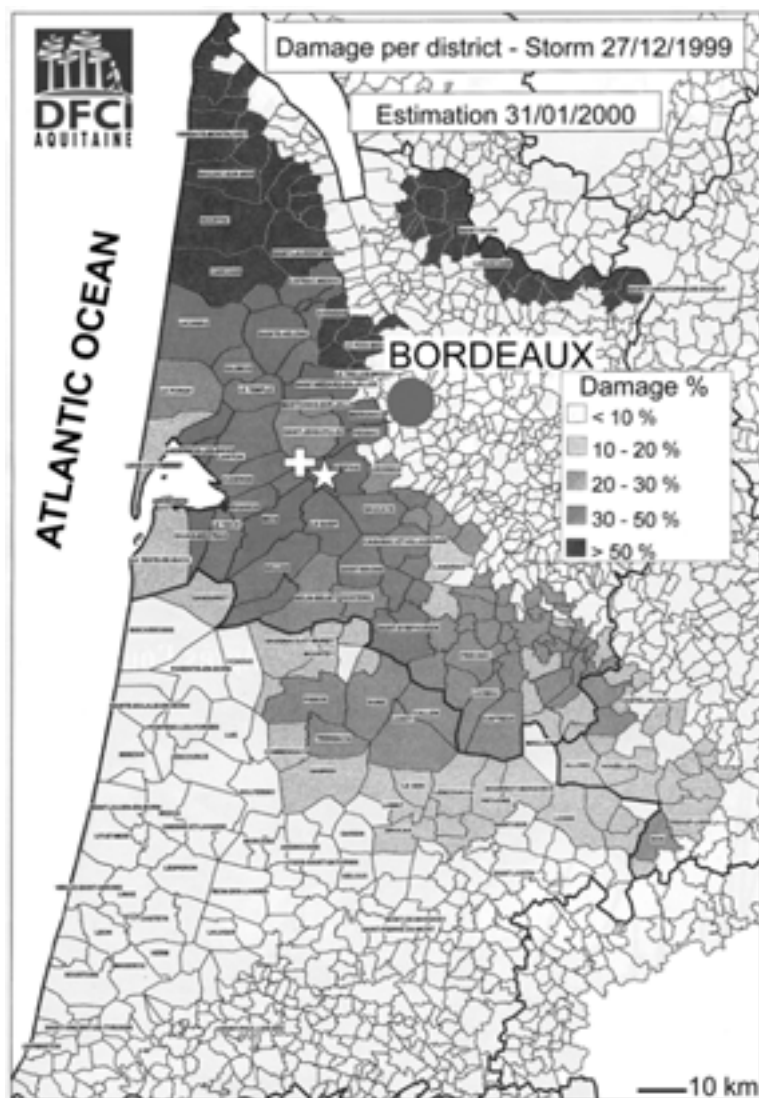


Figure 1. Map of the range in the Landes region indicating the district boundaries, the mean level of forest damage per district and the location of the two study sites: the cross indicates the 20-year-old experimental site and the asterisk gives the location of the 51-year-old experimental site. In the north of the range, certain agricultural districts are not very woody and are shown in white although they lie adjacent to highly damaged districts. Copyright for topographic base and damage belongs to the AR DFCI Aquitaine.

the soil is a hydromorphous humus podzol with a hardened iron pan horizon at a depth of about 60 cm [28, 55].

The location of the sites in a geographical area that had been moderately affected by the storm made it possible to study the effects of the wind. The damage was bad enough to be observed without the stands having been completely destroyed. A meteorological tower between the two sites recorded wind direction and speed from the 1st July 1998 to the 10th October 2000 (Bioclimatology Unit of INRA-Bordeaux). At a height of 40 m above ground, the prevailing winds were mainly from the west and north-west. During the storm of 27th December 1999, the most violent winds occurred between 17 and 24 h Universal Time particularly from the western and north-western directions (235 to 305°).

2.2.1. The 20-year-old stand = “U Plot of Pierroton”

This site covers 4.84 ha divided into 16 plots of 0.12 ha, separated by buffer zones. The plots were distributed according to two densities (2 × 2 or 4 × 4 metres spacing) and two genetic types (natural pine or improved pine). These four silvicultural scenarios were distributed in two scattered blocks determined on the basis of the colour of the surface soil (figure 2A). Therefore, each block contained two

replications. The pines were sown in a nursery in August 1979 and the bareroot seedlings were replanted in December in moist mesophilic moorland fertilised with phosphorous. The stand was 20 years old at the time of the storm. The improved stands correspond to the first improved generation G1 obtained by selecting forest “+trees” and by conducting a progeny test on height and deviation from the vertical at the age of ten in the Saint-Sardos orchard, in south-west France. At other sites, Danjon [13] showed that this first generation generated a genetic gain of 25% in volume and stem straightness. The 2 × 2 m and 4 × 4 m spacings and natural mortality resulted in densities of 1952 stems ha⁻¹ (σ = 82) and 605 stems ha⁻¹ (σ = 10), respectively. As a basis of comparison, the density of 20-year-old Maritime pine stands which have undergone typical commercial silvicultural practices is about 550 to 700 stems ha⁻¹.

2.2.2. The 51-year-old stand = “Saint-Alban site”

This site covers 25 ha of mesophilic moorland divided into 48 plots of 0.23 ha, separated by buffer zones. Plots are distributed according to four densities and two types of phosphorus fertilisation (fertilised or control), representing eight treatments in six scattered

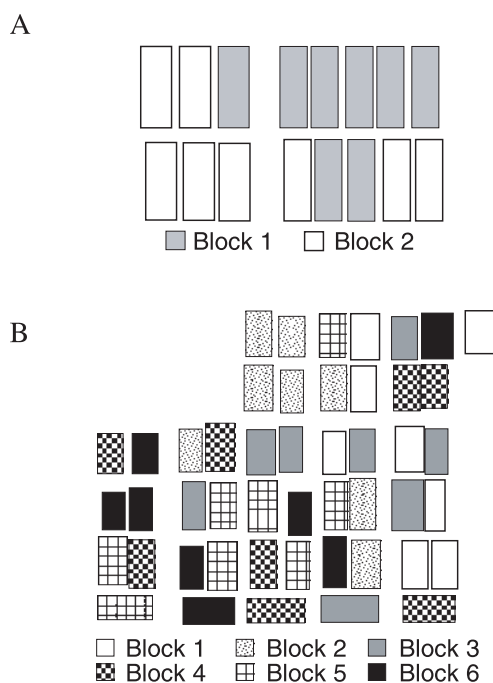


Figure 2. (A) Map of the 20-year-old experimental site with plot boundaries and two different colours for the two blocks. (B) Map of the 51-year-old experimental site with plot boundaries and six different patterns for the six blocks.

blocks (figure 2B). The pines were sown in bands and were 51 years old at the time of the storm. Figure 3 shows the thinning scenarios applied over time, from the first intervention in 1961 until 1999. Each of the four thinning scenarios will be designated in this article by two letters corresponding to the intensity of each of the two differential thinning regimes: “H” for heavy, “L” for light. The four treatments are therefore designated HH, HL, LH and LL. These treatments correspond to four different mean densities in 1999: 624 stems ha^{-1} for LL, 426 for HL, 310 for LH and 185 for HH. Typical densities in production stands of this age are about 350 stems ha^{-1} . Initially, the experimental area was made up of tilled soil plots and controls, and pines in some plots were pruned up to 8 m high and 16 years of age as of 1964. Pruning was never sufficient to result in a measurable effect on growth. Since 1964, natural pruning has raised the base of the crowns above 14 m high and, consequently, artificial pruning has not been considered in the present study on the storm effects. Soil was tilled each year using a rotavator between rows until eight years of age, and then using a covercrop when the canopy had closed so as to avoid damaging the roots. Since the effect of soil tilling on growth had become imperceptible, phosphate fertilisation was applied at the age of 25 years on plots that had previously been “tilled”. Fertilisation was applied once at a dose of 120 kg of P_2O_5 per hectare in the form of slag. The control plots for soil tilling were considered to be fertilisation controls.

2.3. Damage inventory and dendrometric measurements

2.3.1. Damage definitions and inventory

A joint protocol for Maritime pine has been set up by the French forest institutes, INRA, AFOCEL, CPFA and ONF, in order to compare the results of different inventories. The damage suffered by

the stands was differentiated into five categories:

- **undamaged** trees with no hint of wind damage. Some of them were leaning before the storm but have not been included in the “leaning trees”;
- slightly **leaning** pines (visually estimated angle from the vertical $\leq 20^\circ$) with a slightly upraised soil-root plate. They constitute the stand together with the undamaged trees after the harvest of damaged trees;
- **heavily leaning** trees (angle $> 20^\circ$). They are removed from the stand at the time of the sanitary thinning following a storm;
- **windthrown trees** are those that were completely uprooted;
- **breakage**, where stems failed at the trunk level.

Each pine was included in the inventory and we noted its damage state and if it was dead or alive at the time of the storm. In total, we recorded 3276 pines in the 20-year-old experimental site and 4360 in the 51-year-old experimental site.

2.3.2. Dendrometric measurements

For the 20-year-old experimental site, the circumference at 1.30 m height (C130) was measured for all the trees. Measurement of tree height was not possible as stand density was very high, and it was difficult to manoeuvre among the fallen trees.

For the 51-year-old experimental site:

- C130 was measured for all the individuals;
- in each plot, the C130 distribution was split into six quantiles, i.e. 0.25, 0.5, 0.7, 0.8 and 0.9. The median undamaged pine of each quantile was chosen to measure the total height “ H_t ”, and the height of the first living branch using an ultrasound hypsometer (Vertex);
- of the six previously sampled individuals, three were used to estimate the surface area of the crown projection on the soil using a kronenspiegel [36]. The surface areas were calculated via vector processing because the method of Pardé and Bouchon [36] overestimates the surface area to an even greater extent when the crown is eccentric, whereas vector processing underestimates it slightly but to the same extent in all pines. The method used for calculating the surface area of the crown using eight radii separated by 45° angles is summed up in the following equation:

$$\text{Surface} = \sum_{i=1}^8 \frac{(x_{A_i} \cdot y_{A_{i+1}}) - (x_{A_{i+1}} \cdot y_{A_i})}{2}$$

- A_i is the point located at the intersection of a crown radius with the circumference. A_{i+1} is at the intersection of the next radius with the circumference. The co-ordinates for A_i are x_{A_i} and y_{A_i} in the referential axis whose origin is the point at which the northern face of the trunk meets the soil. The y axis is the radius pointing in a northern direction and the x axis the radius pointing towards the east. The asymmetry of the crown of standing pines was defined as the distance between the centroid of its horizontal projection and the centre of the stem at the base of the crown. The co-ordinates of the centroid are the mean of the co-ordinates of the eight points at the end of the eight radii;

- total height of windthrown trees and the height of the first living branch were measured using a decametre;
- the soil-root plates of uprooted pines were clearly delimited and made it possible to accurately measure the eight radii. The soil-root plate surface area was estimated using the method generally employed for estimating the crown surface areas (figure 4) [36]. The measurements were only made on the soil-root plates of uprooted trees and do not concern the “effective” root plate before the damage. However, this protocol does make it possible to make some comparisons between trees and plots. The asymmetry of the root plates of uprooted pines was calculated in terms of the distance between the centroid of the soil-root plate and the centre of the trunk (figure 4). Soil-root plate depth has been found to be constant, around 60 cm. Thus, the surface of the plate was used instead of the volume.

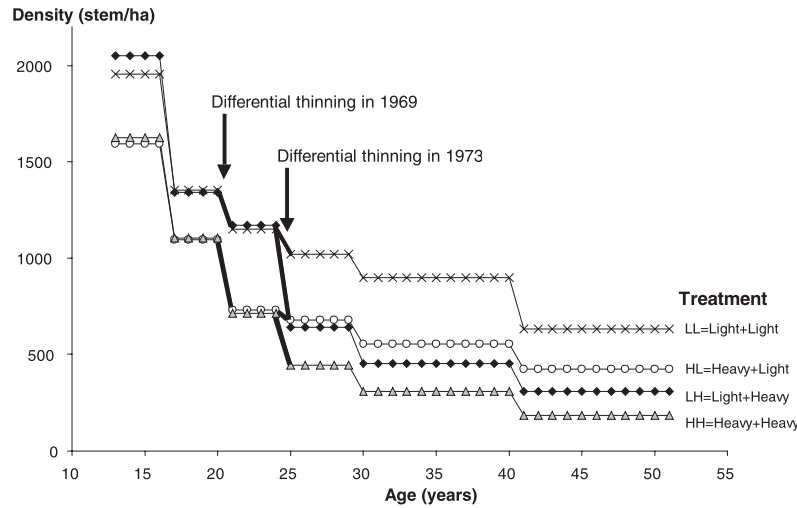


Figure 3. Evolution of mean density according to age per thinning regime from 1961 to 1999.

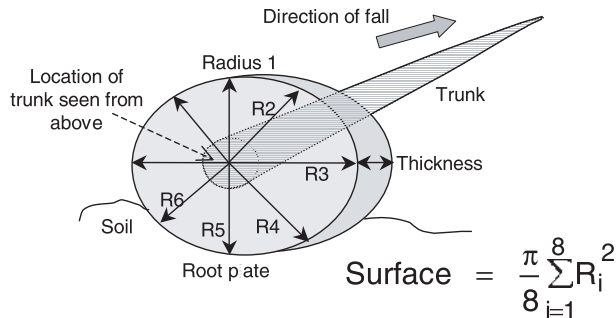


Figure 4. Method for estimating the surface area of the soil-root plates. To calculate the centroid and dissymmetry of the plate, the eight extremities of the radii were localised in an orthogonal referential axis with radii R7 and R3 as the abscissa axis and radii R1 and R5 as the ordinate axis.

2.4. Use of different dendrometric variables

The variables obtained from the sampling operations led us to consider the plot to be a sampling unit: each plot therefore has one value per dendrometric variable. This value is calculated differently depending on the type of variable:

- The mean pine circumference was calculated according to $C_g = \sqrt{C_{moy}^2 + \sigma^2}$, where C_{moy} is the arithmetic mean of C130 of all the pines in the stand and σ is its standard deviation [36];
- The dominant pine circumference C_o is the arithmetic mean of the 100 biggest trees per ha;
- The arithmetic mean per plot was calculated for the variables relating to windthrow, e.g. mean surface area of the soil-root plate, mean direction of tree fall;
- For the non-exhaustive variables, a classical method in dendrometry was used [36]. The relation between the tree height and the circumference was adjusted with the Monod model for each treatment using its 36 couples “ H_t , C130”:

$$H_t = \frac{a \times C130}{b + C130}$$

When the circumference C_g of a given plot is put into the model, it gives the estimate of the height “ H_g ” of the mean pine circumference for the plot. Likewise, the dominant height “ H_o ” is obtained on the basis of the dominant circumference C_o . The base height of the crown has also been adjusted according to C130 with this method. Using the same scatter diagrams, we completed the description of each plot with a standard deviation value to express the variability within the plot. For the dominant height, for example, σ_{H_o} was estimated by applying the model to the “ $C_o + \sigma_{C_o}$ ” value, which gave the “ $H_o + \sigma_{H_o}$ ” value, from which we then subtracted H_o . For the variables calculated arithmetically, the variability corresponds to the real standard deviation of the values.

In total, 59 dendrometric variables characterised each plot in the 51-year-old stand. For the 20-year-old stand, only those variables calculated on the basis of C130 are available, as well as their variability.

At the tree scale, it was more complicated to compare the height of the undamaged and the windthrown trees due to the fact that the two groups of trees were not constituted equally, i.e. all the windthrown trees had been measured, whereas the undamaged pines, of which there were far more, were sampled into circumference categories. Therefore, one Monod model or one allometric model per treatment and per variable was adjusted with the sampled undamaged pines on the one hand and windthrown pines on the other. The mean circumference of undamaged pines and windthrown pines per plot was then calculated and incorporated into the model in order to obtain the mean height per plot and per type of pine. The same approach was applied to the height of the living crown.

2.5. Statistical methods

2.5.1. Logistic regression

Logistic regression enabled us to test the effect of silvicultural scenarios on the percentage of damage. This type of regression predicts an event associated with a likelihood depending on one or several independent qualitative or quantitative variables and thus works with binary data or proportions [24]. The method has the advantage of being robust, even when working with small numbers of individuals, and does not require that the individuals be independent of each other as in the case of χ^2 , since trees in a same plot are not independent individuals.

Table II. Stand density, mean circumference C_g , and dominant circumference C_o in the 20-year-old trial, and their standard deviation per treatment. For a given variable, the values associated with the same letter are not significantly different at the 5% threshold.

Variable	Treatment							
	4 × 4 Natural		4 × 4 Improved		2 × 2 Natural		2 × 2 Improved	
	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd
Density (tree ha ⁻¹)	601	5	609	13	1963	110	1941	61
C_g (m)	0.78	0.04	0.85	0.08	0.57	0.03	0.61	0.02
Differences in block 1		b		a		c		c
Differences in block 2		a		a		b		ab
C_o (m)	0.96	0.06	1.04	0.09	0.85	0.06	0.86	0.02
Differences in block 1		a		a		b		b
Differences in block 2		a		a		a		a

In order to test a treatment effect, it was necessary to remove possible random effects. Different levels of damage in two treatments may be due to the treatments themselves or to a “plot” effect. The logistic regression makes it possible to identify the few plots that generate such an effect. Generally, the plots in a treatment presented a rather regular distribution of levels of damage, but it could possibly happen that one plot showed a very different level of damage than the others. The field measurements did not make it possible to explain such a pattern. These few plots have thus been eliminated from the regression analysis so as to test only the treatment effect on the level of damage. Regression analyses were carried out using the GENMOD procedure (generalised linear model) of SAS software (SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA).

2.5.2. Other methods

The dendrometric differences between treatments were tested by analysis of variance using the Bonferroni t-test and the multiple rank test of Ryan-Einot-Gabriel-Welsch, which performs better in the case of equal numbers of individuals (GLM and REGWQ procedures of SAS). The comparisons between undamaged and windthrown pines were tested by analysis of covariance (REG and GLM procedures of SAS).

3. RESULTS

3.1. Effect of treatments on the dendrometric features of the stands

3.1.1. The 20-year-old stand

A “block” effect on stem size existed given that the pines had a larger mean circumference in block 1 than in block 2. Block 1 was therefore located in a more fertile zone of the site. However, regardless of the block, the decrease in **density** led to a significant increase in the mean stem circumference (*table II*). The **breeding** effect was weak and only the improved stands in the 4 × 4 arrangement in block 1 exhibited a significant gain of +12.7% in mean circumference compared to the natural stands (*table II*). The difference between natural pines and improved pines can therefore only be observed at low densities in the more fertile zone. Moreover, the treatments showed no effect on **variability** of stem size, with respect to either the mean or dominant height.

3.1.2. The 51-year-old experimental site

When the trial first began in 1957, the blocks were set up according to the mean height for each plot: block 1 with mean height of 2.19 m, block 2 at 2.13 m, block 3 at 2.03 m, block 4 at 1.89 m, block 5 at 1.76 m and block 6 at 1.63 m. The pines of blocks 5 and 6 were significantly smaller in terms of height and circumference at 8 years, 13 years and 30 years of age, but they were no longer significantly smaller at 35 years of age.

The effect of **soil tilling** was positive from 13 to 21 years of age with respect to circumference and only at 21 years of age with respect to height. This effect disappeared at 25 years of age and no pruning effect was observed. The “soil tilling” treatment was therefore replaced with phosphate fertilisation, and pruning operations were abandoned.

The **fertilisation** effect was positive with respect to circumference at 30 and 35 years of age. The mean pines in the fertilised plots were 6.5% larger in terms of circumference at both ages.

The effect of **thinning** operations on the circumference became visible at 25 years of age, i.e., four years after the first differential thinning operations. The mean pines in the heavily thinned plots were bigger than those in the lightly thinned plots. Conversely, height was not affected, and stem taper was therefore modified. At 35 years of age, the pines in areas of very low density were far more stocky than pines in areas of very high density. The mean H/D ratio was 72.7 ($\sigma = 2.1$) for the LL plots and 59.7 ($\sigma = 2.4$) for the HH plots.

At 51 years of age, density strongly changed the dendrometric features of the stands (*table III*). This effect was significant for all the variables except for those expressing aerial or root asymmetry. When density increased, the mean circumference decreased and the height increased appreciably. From the LL plot to the HH plot, the mean circumference increased by about 30% and the mean height decreased by about 2 to 3%, i.e., 0.50 to 0.80 m. Consequently, the mean stem slenderness increased with density from 54 for the very sparse plots to 75 for the very dense plots. The crown volume decreased when density increased. From a density of 200 to a density of 700 stems ha⁻¹, the relative crown length decreased by 10% and the horizontal surface area was reduced by 65%. The surface area of the windthrown soil-root plates at 700 stems ha⁻¹

Table III. Mean and standard deviation of the main dendrometric features of the 51-year-old stand per treatment. H: heavy thinning; L: light thinning; F: fertilised stands; C: control stands. For a given variable, the values associated with the same letter are not significantly different at the 5% threshold.

Variable	51-years-old stand															
	Treatment															
	HHC		HHF		LHC		LHF		HLC		HLF		LLC		LLF	
	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd
Density (tree ha ⁻¹)	199	42	171	20	334	64	286	22	422	33	429	48	654	50	616	60
C _g (m)	1.27	0.04	1.39	0.03	1.17	0.03	1.25	0.04	1.12	0.03	1.17	0.02	0.99	0.04	1.05	0.03
	b		a		c		b		c		c		d		d	
C ₀ (m)	1.37	0.03	1.48	0.04	1.33	0.03	1.42	0.04	1.36	0.05	1.38	0.02	1.26	0.05	1.32	0.04
	ab		a		ab		ab		bc		ab		c		bc	
H _g (m)	22.87	0.28	23.86	0.14	23.33	0.21	24.65	0.18	23.12	0.12	24.43	0.10	23.67	0.20	24.38	0.14
	e		b		cd		a		de		a		bc		a	
H ₀ (m)	23.54	0.16	24.39	0.19	24.28	0.15	25.28	0.15	24.09	0.18	25.24	0.08	24.72	0.16	25.34	0.10
	d		c		c		a		c		a		b		a	
Variability of H ₀ (m)	0.56	0.11	0.53	0.12	0.41	0.02	0.31	0.06	0.30	0.05	0.26	0.05	0.25	0.04	0.28	0.07
	b		b		d		c		a		a		a		a	
H/D (mean pine)	56.7	1.2	54.1	0.7	62.4	1.1	61.8	1.6	65.1	1.2	65.8	1.0	75.4	2.6	73.4	1.9
	a		a		c		c		b		b		d		d	
Horizontal crown surface area for mean pine (m ²)	29.2	1.7	35.6	0.6	18.6	1.8	24.0	1.6	15.5	0.8	16.5	0.6	9.5	1.2	12.6	0.9
	b		a		d		c		e		de		g		f	
Surface area of soil-root plate for windthrow (m ²)	4.1	1.5	4.6	1.7	3.3	1.3	3.6	1.4	2.7	1.2	2.8	1.0	2.3	0.9	2.7	1.2
	ab		a		cd		bc		de		dce		e		de	
Relative crown length on trunk for mean pine (%)	35.9	0.7	38.5	0.1	32.2	0.6	33.5	0.4	30.8	0.2	30.1	0.3	26.1	0.5	26.8	0.5
	b		a		e		d		c		c		f		f	
Dominant relative crown length (m)	8.82	0.16	9.47	0.10	8.51	0.17	8.83	0.14	7.86	0.15	8.13	0.09	7.16	0.17	7.75	0.16
	b		a		c		b		de		d		f		e	

represented only 58% of the surface area at 200 stems ha⁻¹. *Figure 5* shows that the surface area of the crown decreased about 10 times more rapidly than that of the root plate.

The **fertilisation** effect can be observed mainly in the aerial parts (*table III*). The circumference, height, crown surface area (*figure 5*) and crown length of pines in the fertilised plots were all greater than those in the control plots. This effect was clearer at low densities because the gain from the HHC plot to the HHF plot was 9% for the mean circumference, 4% for height, 3% for crown length and 22% for horizontal crown surface area. Conversely, no such fertilisation effect appeared in the surface area of the root plate or in the stem taper of the trunk.

3.2. The 1999 storm: mapping of the damage in the experimental sites

The aerial views and maps illustrate the structure of the experimental sites and the density of the plots. The maps also make it possible to control the geographical distribution of the damage (*figures 6, 7, 8 and 9*). No edge effect was visually observed, nor could a zone with the most damage be distinguished. No edge effect was expected since the plots are not very large and close to the non-wooded surfaces. *Figure 6* shows that a small corner of a field was close to the south-western border of the stand but the gusts mainly blew over a large forest stand. The zone effect would thus be expressed by

the local aggregation of damage caused by greater wind activity in the area. It was necessary to verify that there was no zone effect so as to prevent it from interfering with the treatment effect to be studied. The visual control of maps, both from an “overall” approach and from a “treatment by treatment” approach, did not show any potential agglomerates. Moreover, the plots with high damage levels were adjacent to those with low damage level.

The distribution of the angles of fall of the pines showed that they fell between 25 to 165°, with a majority in the easterly direction between 55 to 130°. This is consistent with the climatic data as most of the gusts came from 235 to 305° (Bioclimatology Unit of INRA-Bordeaux). Furthermore, our tree pulling tests for a current mechanical study about anchorage of *Pinus pinaster* have shown that the angle of fall of a tree can differ by more than 45° from the direction of pull due to its anchorage in the soil. Therefore, both meteorological and tree measurements indicate that the direction of the gusts was relatively homogeneous during the storm.

3.3. The stand scale: effects of silvicultural treatments on the damage proportions

The proportions of undamaged trees confirmed the indications given on the maps (*table IV, figure 10*). The 51-year-old stand was less affected by the storm than the 20-year-old one.

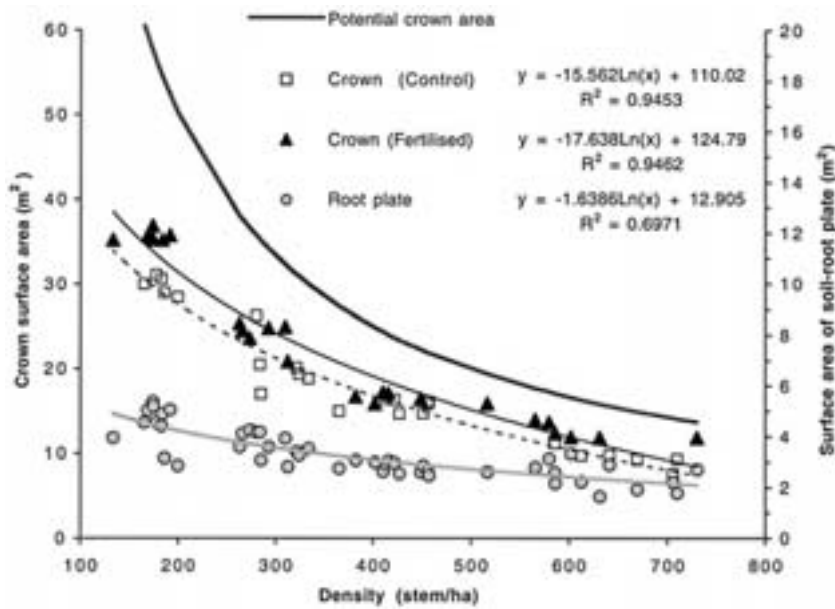


Figure 5. Evolution of means per plot of crown projection area on the soil and the soil-root plate as a function of density. Note the difference in scale between the two vertical axes. The potential crown area is the ratio: 10000m²/density, i.e. the mean available area for one single tree in the canopy. The thin solid line and the dotted line fit the scatters for the fertilised and control stands, respectively.

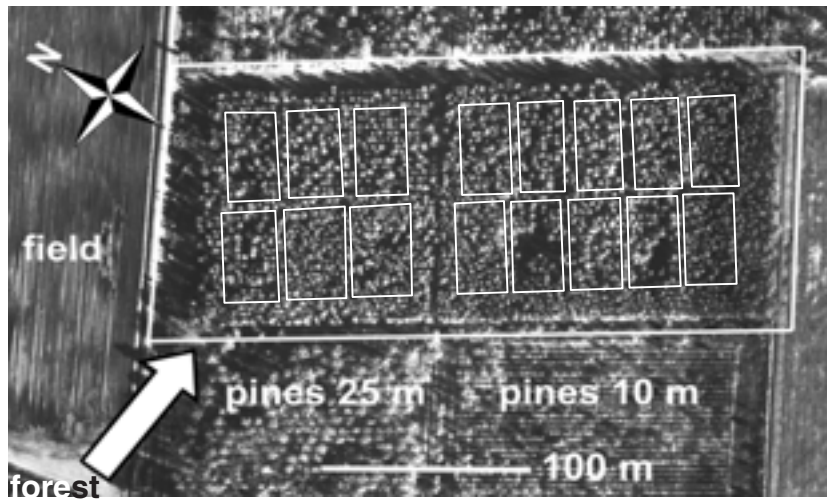


Figure 6. Aerial view of the 20-year-old stand on the 16th January 2000. The white perimeters indicate the boundaries of the experimental plots and stand. The white arrow represents the prevailing wind direction during the storm. The field was a small corner included in the westerly direction in a wide forest stand whose border is shown at the bottom left corner of the picture. The heights of the neighbouring stands in 1999 are indicated, and the studied stand was 16 m high.

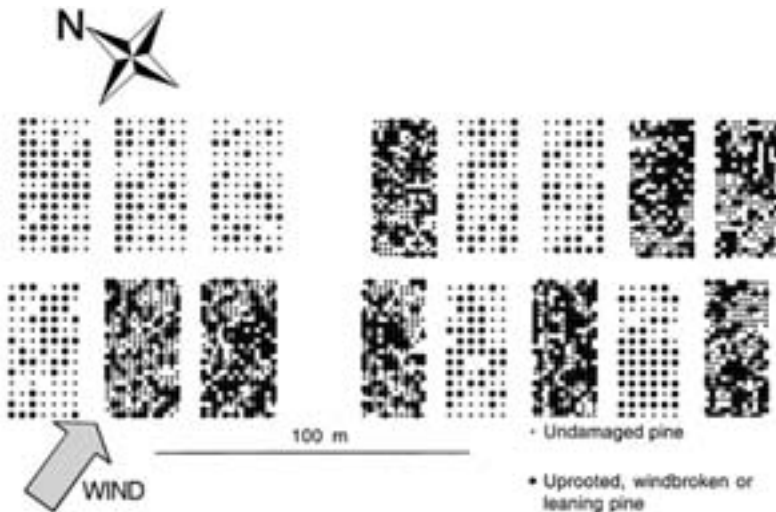


Figure 7. Map of damage to the 20-year-old stand. Each point represents a pine and the position of the pines within each plot is exact.

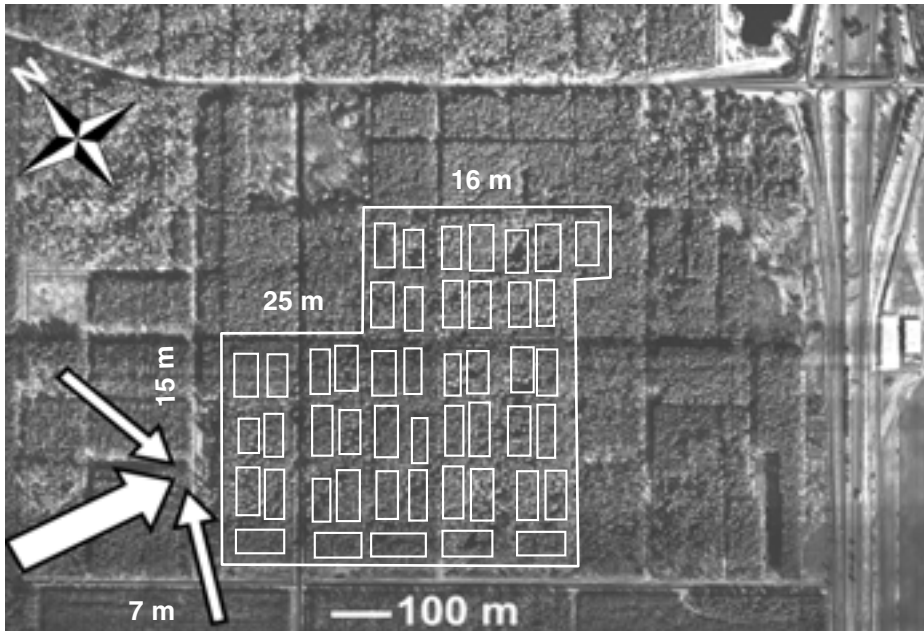


Figure 8. Aerial view of the 51-year-old Saint-Alban site on the 16th January 2000. The white perimeters indicate the boundaries of the plots and stand. The thick white arrow represents the prevailing wind direction. The small arrows show the extreme directions of the wind deduced from the direction in which the pines fell over a 25 to 165° range. The heights of the stands on the windward side of the 25 m-high studied stand are indicated.

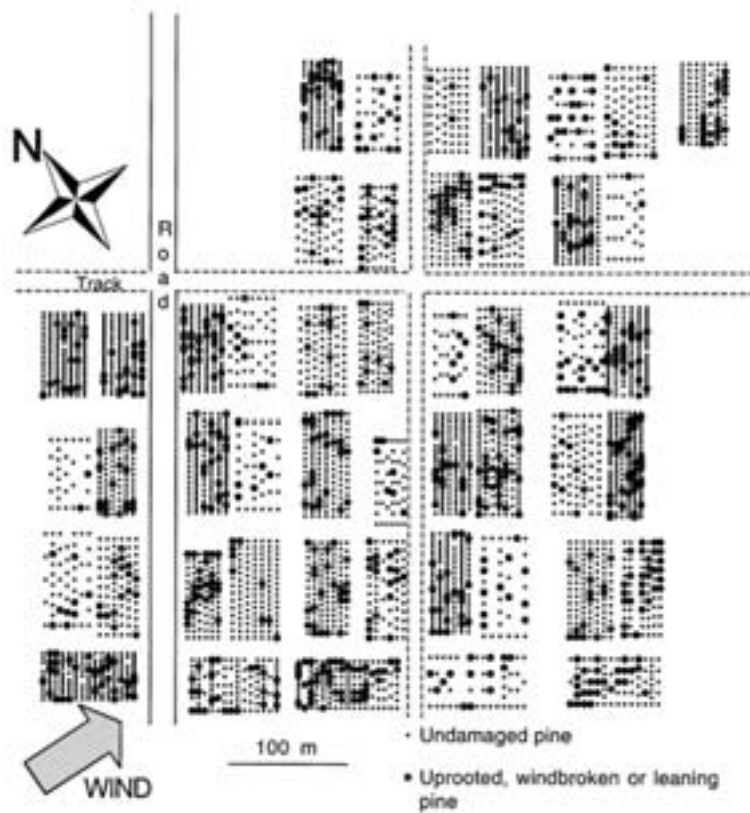


Figure 9. Map of damage to the 51-year-old stand. Each point represents a pine and the position and size of the plots are exact. The pines are shown to be distributed evenly within the plots because their exact co-ordinates were unknown.

Between 70 and 80% of the older stand remained undamaged as opposed to only 40 to 50% of the younger one. However, the damage in the young stand was minor since 50–80% of this damage concerned pines that were leaning but still rooted. In

contrast, the damage observed in the 51-year-old stand was major because 65% of the pines affected corresponded to windthrow. In these plots, breakage and heavily leaning pines represented a small proportion of the stand.

Table IV. Percentage of pines per stand, treatment and damage category. The “Range of density” is the minimal and maximal stand density for the category, in stems ha⁻¹. “Unknown” individuals in the 20-year-old trial corresponded to windthrown trees or heavily leaning trees that were discarded before our inventory was compiled. They have been considered as windthrow in *figure 10*.

Stand age		State						
20 yrs	Treatment code & range of density	Population	Undamaged	Leaning	Heavily leaning	Windthrow	Breakage	Unknown
20 yrs	2 × 2 = 1818–2060	Natural	55.4	36.3	6.1	0.7	1.6	0.0
		Improved	39.7	39.7	14.1	3.5	3.1	0.0
	4 × 4 = 590–618	Natural	49.2	24.0	1.8	8.3	9.8	6.8
		Improved	56.8	21.3	1.5	6.7	5.5	8.2
51 yrs	Treatment code & range of density	Fertilisation	Undamaged	Leaning	Heavily leaning	Windthrow	Breakage	Unknown
51 yrs	LL = 565–730	Yes	79.8	6.1	1.8	10.5	1.7	.
		No	83.0	8.0	2.2	5.6	1.3	.
51 yrs	HL = 365–516	Yes	79.4	5.1	2.0	11.1	2.4	.
		No	75.2	9.6	2.0	10.7	2.4	.
51 yrs	LH = 263–456	Yes	81.6	3.6	1.5	10.7	2.7	.
		No	68.4	5.7	1.9	21.5	2.6	.
51 yrs	HH = 133–280	Yes	76.3	3.9	0.5	16.4	2.9	.
		No	73.9	3.4	0.4	22.4	0.0	.

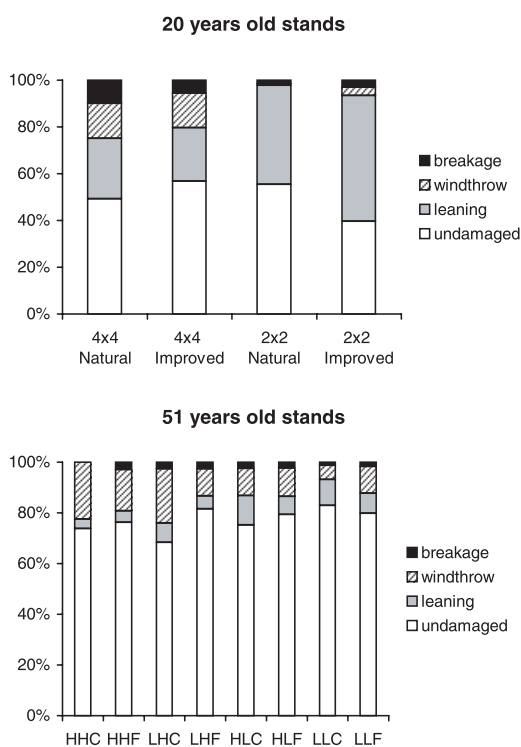


Figure 10. Percentage distribution of damage categories per site and per treatment. The heavily leaning trees are merged with the leaning trees. H: heavy thinning; L: light thinning; F: fertilised stands; C: control stands.

In *figure 11*, the damage in the plots was represented according to C_g , the circumference of the mean pine of the plot, because C_g integrates the effects of the management during the entire life of the stand, whereas the density is an instantaneous parameter. Moreover, C_g made it possible to take the effect of fertilisation on the mean tree size into account within each of the four density categories. C_g also has the advantage of being an efficient management guideline since foresters aim at harvesting the Maritime pine stands when the C_g reaches 1.30 m at breast height. The results are presented in *figure 11* for the two main categories of trees, i.e. the trees leaning at an angle $\leq 20^\circ$ or $> 20^\circ$, and the uprooted pines. The case of the broken trees is discussed in the text. The effect of the treatment on damage proportions was tested by covariance analysis for the 51-year-old stand since the C_g range was well sampled, and by logistic regression for the 20-year-old stand since only two groups of C_g were present in the stand. The logistic regression analysis revealed a few atypical plots that had to be removed from the data to make the comparisons valid.

3.3.1. The 20-year-old stand

• **Spacing effect.** The proportion of **leaning** pines was significantly higher in dense stands, with a C_g of around 0.6 m, whether the pines had been improved by selection or not ($P < 0.001$ within natural stands and $P < 0.001$ within improved stands) (*figure 11A*). Conversely, the proportion of **windthrown** trees was significantly lower in dense stands, regardless of the breeding ($P < 0.001$ within natural stands and $P < 0.001$ within improved stands) (*figure 11B*).

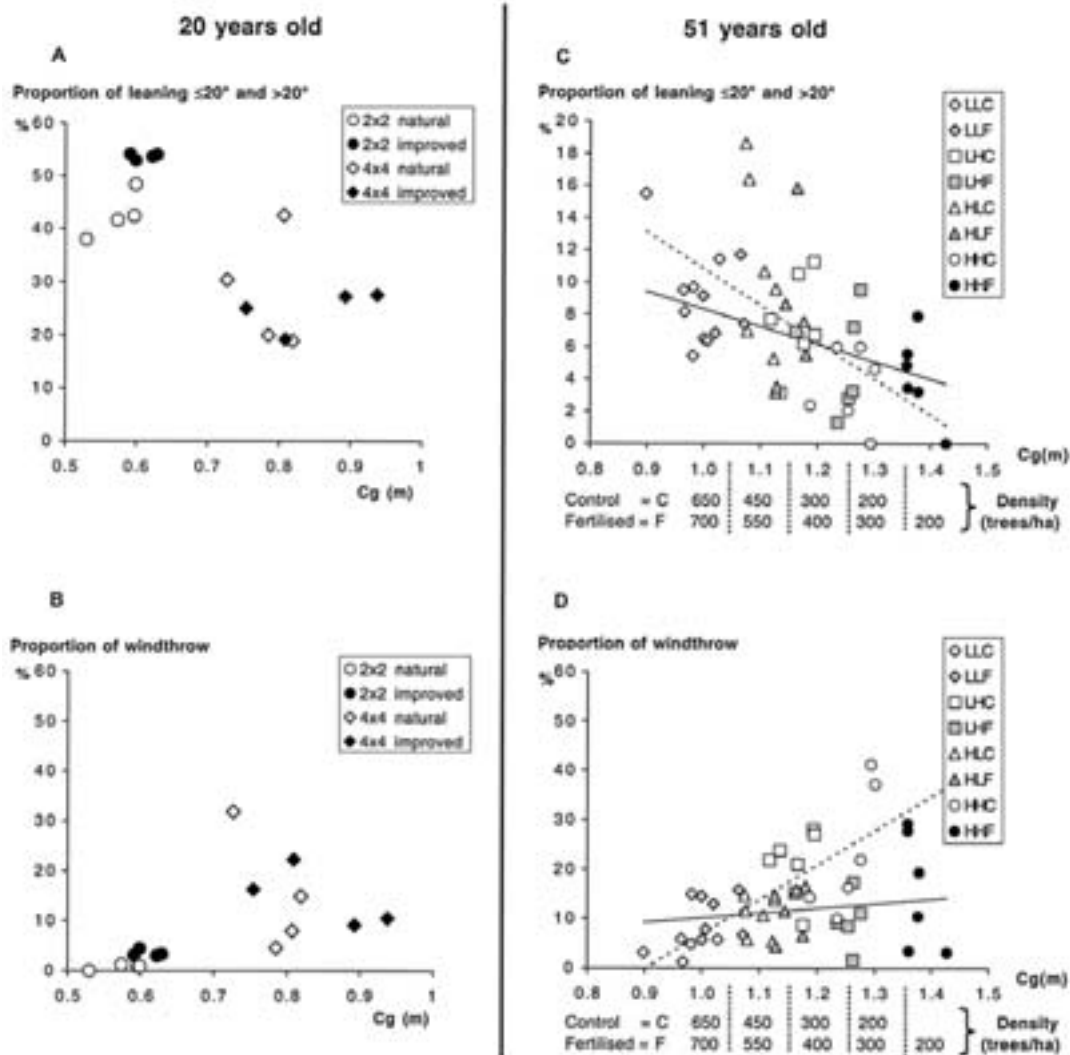


Figure 11. Percentage of pines according to the circumference of the mean pine of the plot per treatment for the leaning trees (angle $\leq 20^\circ$ or $> 20^\circ$), and for the windthrown trees. Note that the Y-scale for the 51-year-old leaning trees (C) is different from the other graphs. The dotted and solid lines are the regression lines for the control and fertilised plots, respectively. The white symbols are for the control plots and the black symbols are for the fertilised plots. For the 51-year-old stand, the stand densities corresponding to the C_g scale are given for control and fertilised treatments.

- **Breeding effect.** Breeding generated two different types of behaviour with respect to damage according to spacing: (i) in dense stands, the proportions of **leaning** and **windthrown** trees were significantly higher in the improved stands than in the natural ones ($P < 0.001$) and (ii) in sparse stands, with a C_g of around 0.85 m, the proportions were not significantly different (figures 11A and B).

For the proportion of **breakage**, the spacing effects are very similar to the results for windthrow, albeit the range of proportion reached only 18.9% instead of 31.8%, respectively. Due to the scattering of breakage percentage within dense stands or within sparse stands, it was not possible to show any significant difference according to breeding. However, it is possible to conclude that in areas of high density, trunks are not very thick and bend easily as the proportion of leaning

trees was high, but hardly ever break. Conversely, in areas of low density, the trees are bigger and do not bend as much. They resist the wind better and eventually fail at the trunk or root level in a small proportion.

3.3.2. The 51-year-old stand

- **Spacing effect.** For the **leaning trees**, the Pearson correlation coefficients between the damage percentage and C_g are significantly negative both for control and fertilised plots: $r = -0.56$ ($P = 0.005$) and $r = -0.42$ ($P = 0.043$), respectively (figure 11C). Therefore, the dense stands with a C_g of around 1 m include 5 to 19% of leaning trees, whereas the sparse stands with a C_g greater than 1.30 m had less than 8% of them. Conversely, the correlation coefficient is

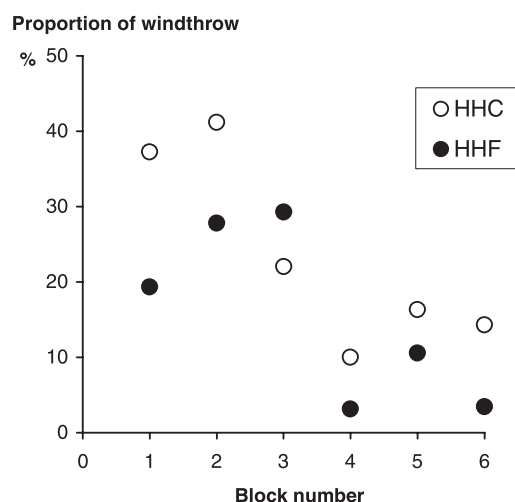


Figure 12. Proportion of windthrow in the six blocks of the 51-year-old stand for the lowest stand densities. HHF: fertilised; HHC: control.

significantly positive for the **windthrown trees** in control plots ($r = 0.73$; $P < 0.001$), and not significantly positive for the fertilised plots ($r = 0.18$; $P = 0.40$) (figure 11D). The percentage of windthrown trees is therefore higher in sparse control stands than in dense control stands.

• **Fertilisation effect.** For the **leaning trees**, the covariance analysis showed that the slopes of the regression lines were not significantly different between control and fertilised plots ($P = 0.18$). Conversely, the slopes for the **windthrow** were significantly different in the control plots and in the fertilised plots ($P = 0.002$). Therefore, phosphorous fertilisation seems to soften the relation between density of the stand and intensity of damage. Moreover, the percentage of windthrown trees is more variable in sparse stands where it may reach values as high as 41% in control stands and 29% in fertilised stands.

For **breakage**, the number of broken trees per plot was so small and variable that it was not possible to show any trend according to C_g or density.

3.3.3. Dendrometric explanation of the windthrow variability in the low density 51-year-old plots

The variability in windthrow proportions in the sparse plots (figure 11D) may be due to spatial phenomena related to wind exposure or proximity between different types of stands. Such variability may reflect a correlation between damage in the adjacent plots or a correlation between damage and density in neighbouring plots. Calculations of the Pearson correlation coefficient showed that this was not the case. Furthermore, the variability in damage could be related to the variability of the dendrometry of the HH plots. An analysis of variance carried out on the HH plots did not show any “block” effect on the different variables. Conversely, figure 12 shows that the proportion of damage is related to the block number. For the fertilised and control plots, blocks 4 to 6 had less windthrow than blocks 1

to 3. The variability in damage is therefore not random. An analysis of variance carried out by placing the blocks in two groups, 1+2+3 and 4+5+6, revealed a significant effect of certain dendrometric variables. The variability in dominant height H_0 and the variability in dominant diameter D_0 were significantly higher for the group of blocks 1+2+3 than for the group of blocks 4+5+6. The standard deviations for H_0 were 0.61 m and 0.48 m, respectively (significant difference at the 0.025 threshold), and the standard deviations for D_0 were 0.035 m and 0.029 m (significant difference at the 0.04 threshold). Blocks 1, 2 and 3 were more **heterogeneous** in terms of dominant circumference and height than blocks 4, 5 and 6, and the importance of stand heterogeneity with respect to sensitivity to wind will be discussed later.

3.3.4. The variables that best explain damage intensity

It is possible to understand how silvicultural treatments determine stand vulnerability to wind by identifying the dendrometric variables that most influence the proportions of windthrow, breakage and leaning pines in the stand. For the 51-year-old stand, the best explanatory variables in a damage category were identified among the 59 potential variables by calculating the correlation coefficients and checking the linearity on the scatter diagrams. Explanatory variables differ according to the type of damage.

The proportion of **windthrow** showed the highest correlation with the variability in the dominant height, ETH_0 , ($r = 0.612$; $P < 0.001$). There is more windthrow in plots with dominant pines having a wide range of heights. For this study, the standard deviation of the dominant height was deduced from the inventory of C130 and from the non-linear relation between height and C130. It is therefore worth noting that the initial variables, “dominant circumference” and its “standard deviation”, were not correlated with the windthrow intensity, where $r = 0.138$ ($P = 0.350$) and $r = 0.204$ ($P = 0.163$), respectively. Thus, converting C130 and its standard deviation into height provides information that is more closely related to vulnerability to windthrow. The variable ETH_0 is significantly and inversely correlated to stand density ($r = -0.725$; $P < 0.001$) and high values are therefore associated with sparse stands. This factor partly explains why there is more windthrow in areas of low density (figure 11D). Moreover, the second well-correlated variable was the variability of relative crown length of the dominant trees ($r = 0.566$; $P < 0.001$). The intensity of windthrow is higher in the stands where there is a wide range of crown lengths within the dominant trees. Both variables are an indication of the influence of the heterogeneity of the stand on the risk of windthrow.

The proportion of **leaning pines** was negatively correlated with the dominant crown length ($r = -0.533$; $P < 0.001$). The proportion of leaning trees increases if the length occupied by the crown on the trunk decreases. This result is the consequence of the fact that the pines with short crowns are mainly in high density stands where they have less chance of being uprooted and are therefore more likely to lean after the storm (figures 11C and D).

For **breakage**, no significant correlation was found and the dendrometric variables did not suffice because this type of damage is no doubt due to the mechanical properties of the

wood in the stem instead. Moreover, breakage frequency was negligible in many of the plots.

3.4. The tree scale: differences between undamaged pines and damaged pines

In addition to the previous results which concerned wind-firmness at the stand scale, we also studied the dendrometric differences between undamaged pines and pines damaged by the storm. This comparison required the use of dendrometric variables that are common to both categories: circumference, total height, height of first living branch, absolute and relative crown lengths.

In the 20-year-old stand, there was no significant difference in circumference between the categories of damage in the 4×4 spacing. Conversely, the 2×2 spacing showed that the windthrown pines were significantly bigger than the other categories of trees. The mean circumference was 55.5 cm for the undamaged natural pines and 73.2 cm for the windthrown trees. For the improved pines, the values were 60.1 cm and 74.0 cm, respectively.

In the 51-year-old stand, no significant differences in circumference were observed between the different pine categories within a treatment since inter-tree variability in circumference was large. Hence, we used the mean circumference for each plot to compare pine categories. The graphs in *figure 13* compare the measurements of the mean undamaged pines and windthrown pines for each plot. The slope differences in the linear adjustments of the “undamaged” and “windthrow” scatter diagrams were tested by analysis of covariance.

In *figure 13A*, the slopes of the two scatter diagrams are significantly different ($P = 0.002$). The mean circumference of windthrow (120.0 cm) is significantly 3.6 cm smaller than the mean for undamaged pines (123.6 cm) at density under 500 stems ha^{-1} ($P = 0.004$). Beyond 500 stems ha^{-1} , this difference is no longer apparent. *Figure 13B* shows that the mean height of the windthrown trees is significantly 40 cm shorter than the mean height of the undamaged trees ($P < 0.001$, equal slopes). The first living branch of windthrow is significantly 57 cm higher than for undamaged trees ($P = 0.049$, equal slopes). The space between the two heights represents the length occupied by the crown on the trunk. *Figure 13B* also illustrates the increased height of the living branch as the density increases, whatever the category, whereas the total height varies little. However, the heights were not measured in exactly the same way for the windthrow and the undamaged pines. The former were measured on the ground using a decametre and the latter were measured upright using an ultrasonic hypsometer. However, if the relative crown length on the trunk is considered (*figure 13C*), this bias is eliminated. The relative crown length was significantly shorter in the windthrown pines than in the undamaged pines ($P < 0.001$, equal slopes), i.e., the crowns of windthrown trees were 10% shorter than those of undamaged trees.

Lastly, the *H/D* ratio is often used to describe forest stand stability. Here, this ratio is used at the tree scale in order to illustrate the combination of the results found with C_g , on the one hand (*figure 13A*), and with the mean height, on the other hand (*figure 13B*). The slopes of the two scatter diagrams were

significantly different (*figure 13D*; $P < 0.001$). For densities under 350 stems ha^{-1} , the *H/D* ratio of the mean windthrown tree was significantly greater than that of the mean undamaged pine ($P = 0.03$). But at densities above 350 stems ha^{-1} , the difference was reversed and also significant ($P = 0.04$).

To summarise, the trees most resistant to uprooting in plots within this 51-year-old stand had the following features:

- for low densities of about 200 stems ha^{-1} : the tallest trees with the largest C130, those with a long crown in relation to their height, and the least tapered trunks;
- for high densities of about 500-600 stems ha^{-1} : once again, the tallest trees with a long crown but smaller C130 and more tapered.

This typology gives an indication of the “individual” and “stand” effects that more or less predominate, depending on stand density.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

The storm caused moderate damage spread out over the study area (*figures 1* and *10*). This level of damage thereby makes it possible to compare the effects of different factors on wind-firmness. Most of the damage at the experimental sites was windthrown or leaning trees and breakage only occurred occasionally. As previous studies [3, 9, 31, 37, 41] have pointed out, windthrow occurs when the overturning moment caused by the wind exceeds various resistive forces in the root anchorage. The overturning force has two components: (i) the lateral force applied to the crown by the wind and (ii) the weight of the tree as it is bent by the wind. There are also two main resistive forces: (i) the damping of swaying of the aerial parts due to contact between crowns and (ii) the root anchorage due to the weight of the soil-root plate, the resistance to shearing of the soil, the tensile strength of roots on the windward side of the plate and the resistance to bending of the roots and soil in the hinge region on the lee side of the tree.

It is therefore possible for us to discuss our results for Maritime pine stands at the stand scale and at the tree scale, within this general framework.

4.1. Vulnerability to wind at the stand scale

4.1.1. Stand density and the damping stand effect

Thinning operations are a major element of silviculture and an important factor with respect to wind as they temporarily reduce stand stability [1, 11, 30, 51, 57]. Our experimental installations were unable to provide information on the effect of time since the last thinning operations because the 20-year-old stand had not yet been thinned and the 51-year-old stand had been thinned 16 years before the storm in all the plots at the same date (*figure 3*). However, these trials made it possible for us to study a variety of consequences of different degrees of thinning on tree density per hectare.

For the two trials, the denser stands resisted windthrow the most effectively and bending the least effectively (*figure 11*). Previous studies on cultivated stands indicate either an increased risk of damage as the density increases, e.g. in *Pinus*

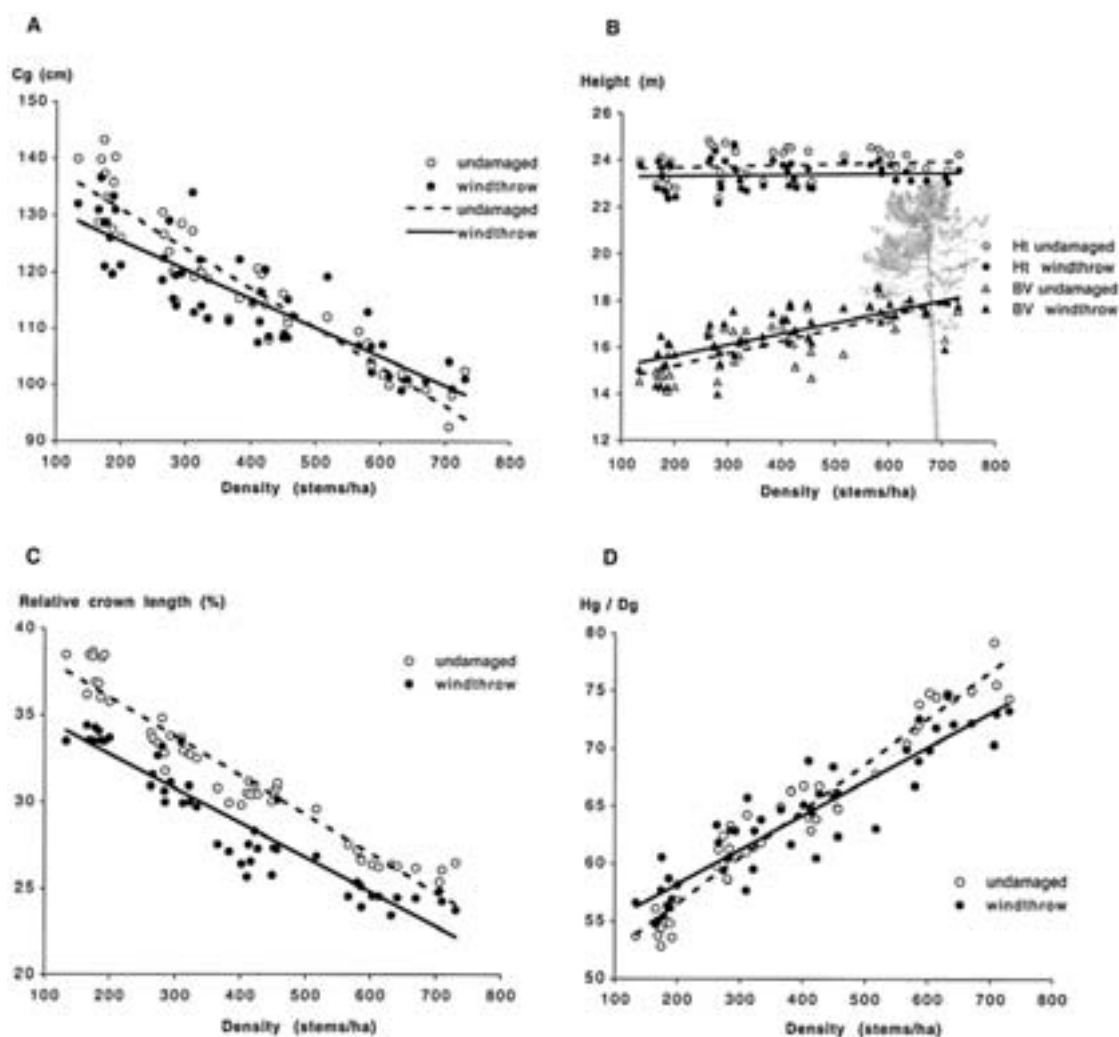


Figure 13. (A) Circumference of mean undamaged pine and windthrown pine per plot as a function of plot density in the 51-year-old trial. The straight lines indicate the linear trend of each scatter diagram, with the dotted lines corresponding to the undamaged pines. (B) Total height (H_t) and height of the lowest living branch (BV) for mean undamaged pine and windthrown pine per plot as a function of plot density. (C) Relative crown length of mean undamaged pine and windthrown pine per plot as a function of plot density. (D) Height/diameter ratio of mean undamaged pine and windthrown pine per plot as a function of plot density.

radiata [11], *Pinus sylvestris* [56] and *Picea abies* [1], attributed to the increase of H/D ratio, or a reduced risk as in *Picea sitchensis* on a peaty gley soil [9]. However, Gardiner et al. [21] argue that these studies did not consider that the wind loading on trees at wider spacing is higher and leads the trees to overturn rather than to break. Maritime pine soil-root plates at our study sites clearly have a “pancake” type shape as root growth is restricted to a depth of about 60 cm by the hardened iron pan horizon or by the presence of the water table [28, 55]. These constraints mean that the root system cannot be very deep and that it develops due to a large number of short secondary taproots. As the depth cannot increase, the surface of the soil-root plate has to be considered. The surface area of the soil-root plate decreases ten times less rapidly than that of the crown according to stand density (figure 5). Therefore, in such

shallow soils, the ratio between the two is more unbalanced at low densities. The above-mentioned particularities thus favour damage from windthrow. Furthermore, the comparison between the “potential crown area” and the crown surface area showed that stands with a density greater than 400/ha have closed canopies (figure 5). Finally, the greater resistance of dense plots can be explained by a **three-fold** stand effect. Firstly, the wind loading would be lower in the dense stands because of the increased difficulty of air circulation [21]. Secondly, the contact between crowns would make it possible to spread the kinetic energy transmitted to the tree by the wind more evenly in the canopy [31, 51, 57], and the energy transmitted to the trunk and roots would be reduced and therefore easier to withstand. As Milne aptly demonstrated [31], the damping of swaying is mainly due to three components in a

5/4/1 ratio: the interference of branches with those of neighbouring trees, the aerodynamic drag on foliage and stem stiffness. The most widely spaced trees are the least dependent on their neighbours for resistance to moderate wind but are vulnerable to extreme winds, and the vulnerability of thinned stands declines as soon as the crowns recover [21]. Therefore, the damping in the crowns is a very important factor to be taken into account. Thirdly, our field observations showed that nearby trees have interlaced roots. Therefore, resistance of anchorage is higher than for isolated trees.

At equal densities of close to 600 stems ha⁻¹, the 51-year-old pines suffered far less from the storm than the 20-year-old ones: the total level of damage was 20% for the former as opposed to 50% for the latter. Despite the lack of meteorological data, the hypothesis that the gusts of wind were similar at the two sites is likely because the sites were only 4 km apart in a totally flat field and the storm lasted seven hours. Under this hypothesis, the results contradict the positive relation generally observed between level of damage and stand height, i.e. age, which can be explained by an increasing wind speed as height increases [42]. As was previously observed for the density effect, the crown size in the two stands could also explain this difference. In the 20-year-old pines at a density of 600 stems ha⁻¹, the crowns had little contact with each other. Conversely, the 51-year-old pines were within a closed canopy where the crowns were in close contact. This structural difference in the canopy could possibly have resulted in decreased wind loading and increased damping effect.

Within the sparse 51-year-old stands, damage was greater on the whole and highly variable between plots (*figure 11*). When the density decreases, the stand effect in canopies disappears and wind-firmness depends more on the features of the individual elements. On the basis of these results, forest management of Maritime pine on this type of soil should aim at increasing the density to provide better canopy closure and improved windthrow resistance.

4.1.2. Breeding effect on wind-firmness

In the 20-year-old stands, genetic improvement only increased the proportion of damage at very high densities that are improbable in production forests (*figure 11A and B*). This can be explained by two complementary hypotheses. First of all, at high densities, improved pines are taller [12] and probably have longer crowns than natural pines. This assumption is supported by results for the dense 51-year-old stands if we consider that breeding effects are similar to those of fertilisation in relation to tree size. The dominant fertilised trees had crowns that were about 0.6 m longer than those of dominant control trees. Therefore, trees that grow rapidly due to either fertilisation or breeding may have larger crown biomass and, therefore, higher wind loading. Secondly, breeding for stem size may cause a decrease of the root/stem biomass ratio and result in decreased stability [34]. Nevertheless, the improved population studied here was selected using both height and stem straightness as selection criteria. Breeding for stem straightness may have lessened the decrease of root/shoot ratio, especially in the 4 × 4 m stands where the trees are more vigorous but as stable as the natural trees.

4.1.3. Phosphate fertilisation effect on windthrow resistance

The fertilised plots showed less windthrow than control plots at low densities and no significant difference at high densities (*figure 11D*). The effect of phosphate fertilisation on growth is still visible 26 years later although it was only applied once at 25 years of age. The gain in terms of circumference and, above all, in terms of height is maintained over time but its relative importance decreases [23, 55]. The horizontal extension of the crowns has been found to be significantly 15% greater in fertilised plots although only three representative pines per plot were measured (*figure 5, table III*). Therefore, the lower proportion of windthrow in the sparse fertilised stands could be explained by the effects of the three main components of damping [31]. Firstly, the greater closure of the canopy would increase the interference of branches. Secondly, the aerodynamic drag on foliage would increase as the crown became larger. Finally, the damping in the stem would increase since the diameter is 7–9% greater on the average. Therefore, the sparse fertilised stands benefited from a better damping effect than the control stands.

In an attempt to improve management, our results indicate that phosphate fertilisation applied at 25 years of age decreases the windthrow proportion in the range of densities found in commercial stands, i.e., 200–350 trees ha⁻¹ (*figure 11D*, C_g around 1.30 m). However, we recall that the fertilisation is applied at the plantation establishment in commercial practice in the Landes region.

4.1.4. Why are there three different types of damage?

Uprooting and trunk breakage phenomena were found within the same stands, with uprooting as the dominant type of damage. Proportions of windthrow, leaning and breakage were correlated with different variables to varying degrees. During a storm, the dendrometric features [52] and health status of stands and the abiotic variables (wind, soil and water) are combined to determine the proportion of each type of damage.

In this study, the level of **breakage** has been positively correlated with the mean circumference of the plot at 20 years of age and not significantly correlated with any variable in the 51-year-old plots. This is no doubt a sign that there are not enough efficient variables, particularly with respect to the physical properties of wood. Previous studies on breakage phenomena particularly focus on these properties [4, 37, 40] and factors that decrease stem strength such as knots [22] or decay [47]. The insect *Dioryctria sylvestrella* is no doubt responsible for some of the trunk breakage observed, but the features of these attacks only explain a minority of breakage. In fact, *D. sylvestrella* mostly attacks pine trees under 20 years of age, i.e. below 15 m from the soil, and this occurs horizontally at the whorl level or, more rarely, between whorls [27]. The breaks measured in the 51-year-old stand were distributed quite regularly between 0.5 and 23 m, and the oblique break was often spread over 0.5 to 2 m of the trunk.

The variability in dominant height makes it possible to understand variability in the level of **windthrow** in the 51-year-old stands. The most affected plots are more

heterogeneous than the least affected plots, in agreement with the results of Smith et al. [49]. One could hypothesise that the increase in canopy roughness could cause more turbulence in the wind flow and subject the trees to more violent gusts [11]. Spatial distribution of the pines within the sparse plots could also explain the variability of damage. Heterogeneity involves many different situations with respect to neighbouring trees and modifies their wind-firmness [21].

The level of **leaning pines** has been mainly correlated with crown length in the dominant storey. When it increases, the level of leaning pines decreases. This relation may be the translation of the interaction between stand effect and tree effect on wind-firmness. In dense plots, the crowns are in close contact and the stand effect prevails because each tree damps out vibrations due to wind as it is pushed against its neighbours. As a consequence, many pines lean because they cannot be uprooted. At lower densities, the stand effect decreases and more trees can be uprooted since their neighbours are too far away to provide any support. These assumptions imply that the relationship between the percentage of leaning pines and crown length is only a correlation. The crown length would be a better indicator of the local competition than the density itself but it would not be a true wind resistance factor.

4.1.5. Further studies

The relations presented in this study were aimed at explaining the level of damage per plot as a function of the mean variables per plot. The variables based on soil-root plate proved not to be effective. A likely reason would be that it was only possible to measure the features of the soil-root plates for the windthrown trees and the possibility of bias was high. In fact, this bias would tend to underestimate differences between plots since the measurements only concerned windthrow, i.e. pines exhibiting suitable features for uprooting. In plots with high levels of windthrow, a large number of plates were measured and the mean is probably quite accurately representative of the plot. In the plots with low levels of windthrow, the few plates measured resembled those of the previous plots and it was not possible to measure a large number of non-uprooted plates. Therefore, the mean is less representative of the plots, differs little from the mean for high levels of damage and, finally, the correlation with damage level is low. It would therefore be appropriate to be able to characterise the root plates of the undamaged pines in order to check this hypothesis and demonstrate the relative importance of root and aerial systems [38, 50]. Studies based on modelling the architecture of undamaged pines [14] and windthrow were undertaken with this in mind [5, 18].

The relations showed that the level of damage was better explained by variability in dendrometric features within a stand rather than by the features themselves. In such monospecific and even-aged stands, variability in structure and architecture therefore seem to be essential to understanding wind behaviour and other studies have also been undertaken to understand and model how they evolve [2, 6, 8, 14]. In the stand studied, other variables were more pertinent than the stem taper factor H/D , despite the fact that it is often considered to be an essential indicator of stand stability [1, 3, 11, 35, 57]. It would therefore appear that this ratio is not very indic-

ative for Maritime pine, which usually has a stem taper value below the threshold of 80, often recommended to obtain wind-resistant stands [44].

Lastly, the correlations for the 51-year-old stands showed that stand stability appears to be based on dominant pines rather than on mean pines. This observation has also been made in several studies conducted previously, showing a considerable increase in forest vulnerability when the dominant individuals are eliminated [11, 57].

4.2. Vulnerability at the individual scale

The results enabled us to see which pines in a given stand were the most vulnerable to wind loading. When comparing circumferences, no clear difference appeared between the different types of damage within each treatment at 20 years of age, with the exception of very dense stands where the uprooted pines appear to be bigger. At 51 years of age, and at a density of below 500 stems ha^{-1} , the pines with a large circumference (*figure 13A*) and the least tapered trunk (*figure 13D*) were more resistant to windthrow. This is consistent with the results found at the stand level, as the fertilised stands at low density, i.e., with bigger pines, showed less windthrow than the control stands (*figure 11D*). Under 500 stems ha^{-1} , undamaged trees were 3.6 cm larger in circumference than windthrown trees. If the trunk is considered as a homogeneous circular beam, its stiffness is related to the fourth power of the diameter [33]. Therefore, this 3% increase in C130 implies an increase in stem strength of 12.5%. Consequently, stems of undamaged trees are able to better damp the swaying due to wind loading [31].

At the densities found in production forests in the Landes region, windthrown trees have shorter crowns than the undamaged pines (*figures 13B and C*), in agreement with the results of Dunham and Cameron for *Picea sitchensis* [17]. A model has already been established for a 26-year-old *Pinus pinaster* stand close to our study sites [39]. This model estimates the crown length from diameter at breast height with the allometric relation. On the basis of this model, we logically found that the windthrown trees have a shorter crown length because they have a smaller diameter. The differences between the crown length of undamaged and windthrown pines that we have measured are actually greater than what was expected with the model, i.e., the crowns were 10% shorter versus 2% as predicted by the model. This is probably due to the selection by the storm of pines with a short crown for a given diameter whereas the model has been built with a sample with no bias with regard to the crown length.

Finally, compared to windthrown pines, the most wind resistant pines in a stand were bigger and taller, i.e., the least tapered, and had a longer crown at normal densities. These features make it possible for them to benefit from better damping of the swaying due to gusts since the crown is larger and the stem more rigid.

Our study focused on two field experiments, which are part of a group of studies that have been undertaken or extended by all forestry research bodies in France following the exceptional storms of December 1999. It made it possible to unveil clues that will help in understanding wind-firmness in Maritime pine, a subject that has been dealt with little in this species

of considerable economic importance. This knowledge can only be achieved if abiotic features of forests in the Landes region and the silvicultural practices used there are taken into consideration. These features include soil conditions, stand density, thinning regime, establishment method and improvement level. A comparison between undamaged pines and damaged pines as well as the effect of density on stand wind-firmness has shown that it is necessary to take several scales into consideration, from the intra-tree level (architecture and biomechanics), to the stand level (structure and silviculture), as well as to the level of all the stands in the landscape.

Acknowledgements: These studies were undertaken and financed by emergency INRA funding to collect data soon after the storm and the arrival of V. Cucchi on a fixed-term contract. They were continued with the help of DERF via the Public Interest Group ECOFOR as part of the “Silviculture and wind-firmness in Maritime pine stands” contract associating INRA, AFOCEL, CPFA and ONF. Moreover, the Aquitaine region has financed the study “Pine and wind: from the study of stability to the analysis of the effects of the storm on forests in the Landes region”. INRA’s “Department for Forests and the Natural Environment” completed the funding of the fixed-term contract. Our main technical collaborators were M. Antoniazzi, F. Bernier, M. Curtet, B. Issenhuth, B. Kubinyi and F. Lagane. We would also like to thank P. Ancelin, J.-M. Carnus, F. Danjon, J.C. Hervé, T. Fourcaud, C. Meredieu, M. Najjar, A. Stokes and P. Trichet for their helpful suggestions, as well as anonymous reviewers, B. Lemoine for the long-term scientific follow-up of the experimental stands, and A.-M. Wall and G. Wagman at the Translation Department of INRA for the English translation of this paper.

REFERENCES

- [1] Becquey J., Riou-Nivert P., L’existence de “zones de stabilité” des peuplements, conséquences sur la gestion, *Rev. For. Fr.* 39 (1987) 323–334.
- [2] Bert D., Danjon F., Loustau D., Porté A., Trichet P., Champion I., Topology and geometry measurement of root and shoot architecture of *Pinus pinaster*, in: INRA Research Unit on Tree Physiology (Ed.), Workshop “Functionnal-Structural Tree Models”, 12–15 octobre 1998, Clermont-Ferrand, France, 1998, pp. 7–8.
- [3] Bouchon J., État de la recherche relative aux dégâts forestiers dus aux tempêtes, *Rev. For. Fr.* 39 (1987) 301–312.
- [4] Cameron A.D., Dunham R.A., Strength properties of wind- and snow-damaged stems of *Picea sitchensis* and *Pinus sylvestris* in comparison with undamaged trees, *Can. J. For. Res.* 29 (1999) 595–599.
- [5] Carnus J.-M., Bert D., Cucchi V., Loustau D., Trichet P., Silvicultural factors influence windthrow in Maritime pine stands, *Eur. For. Inst. Proc.* 45 (2002) 81.
- [6] Champion I., Dewar R., Loustau D., Bert D., Danjon F., Coupling SAR data with forest growth models, *Int. J. Remote Sens.* 21 (2000) 1763–1766.
- [7] Cooper K.R., Ruel J.C., Pin D., Wind tunnel measurements of the surface winds on a model of the Montmorency forest to investigate the effect of topography on the windthrow of trees, National Research Council of Canada Report LTR-A-4, Ottawa, 1996.
- [8] Coudurier T., Barthélémy D., Chanson B., Courdier F., Loup C., Modélisation de l’architecture du pin maritime *Pinus pinaster* Ait. (Pinaceae): premiers résultats, in INRA (Ed.), Les Colloques “Architecture des arbres fruitiers et forestiers”, Paris, 74 (1995) 305–321.
- [9] Coutts M.P., Components of tree stability in Sitka spruce on a peaty grey soil, *Forestry* 59 (1986) 173–179.
- [10] Coutts M.P., Nielsen C.C.N., Nicoll B.C., The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers, in: Stokes A. (Ed.), *The supporting roots of trees and woody plants: Form, function and physiology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000, pp. 3–17.
- [11] Cremer K.W., Borough C.J., McKinnell F.H., Carter P.R., Effects of stocking and thinning on wind damaged plantations, *N.Z. J. For. Sci.* 12 (1982) 244–268.
- [12] Danjon F., L’amélioration génétique et ses conséquences sur les modèles de croissance, *Rev. For. Fr.* 67 (1995) 192–202.
- [13] Danjon F., Observed selection effects on height growth, diameter and stem form in Maritime pine, *Silvae Genet.* 44 (1995) 10–19.
- [14] Danjon F., Bert D., Godin C., Trichet P., Structural architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod, *Plant Soil* 217 (1999) 49–63.
- [15] Delvaux J., La coupe systématique, *Ann. Gembloux* 82 (1976) 155–169.
- [16] Doll D., Les cataclysmes météorologiques en forêt, Thèse Université Lumière Lyon 2, 1988, 676 p.
- [17] Dunham R.A., Cameron A.D., Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce, *For. Ecol. Manage.* 135 (2000) 73–81.
- [18] Espagnet C., Danjon F., Fourcaud T., Lagane F., Stokes A., Forest damage after the 1999 storm. Comparison of stem wood properties and root architecture between uprooted and standing mature Maritime pine trees, *Eur. For. Inst. Proc.* 45 (2002) 85.
- [19] Faure A., Pellet J., Détermination des efforts exercés par le vent sur un arbre, *Agronomie* 4 (1984) 83–90.
- [20] Fourcaud T., Lac P., Mechanical analysis of the form and internal stresses of a growing tree by the finite element method, in: Engin A.E. (Ed.), *Engineering systems design and analysis*, Proceedings, Am. Soc. Mech. Eng. 77 (1996) 213–220.
- [21] Gardiner B.A., Stacey G.R., Belcher R.E., Wood C.J., Field and wind-tunnel assessment of the implications of respacing and thinning on tree stability, *Forestry* 70 (1997) 233–252.
- [22] Gardiner B.A., Peltola H., Kellomaki S., Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees, *Ecol. Model.* 129 (2000) 1–23.
- [23] Gelpe J., Lefrou G., Essai de fertilisation minérale sur pin maritime à Mimizan (Landes). Résultats après la 26^e année, *Rev. For. Fr.* 38 (1986) 394–400.
- [24] Guisan A., Harrell F.E., Ordinal response regression models in ecology, *J. Veg. Sci.* 11 (2000) 617–626.
- [25] Hermeline M., Rey G., Les chablis: l’Europe dans le vent, in: *Parlement Européen* (Ed.), “L’Europe et la forêt”, CECA-CE-CEEA, Bruxelles, 1994, 768 p.
- [26] Huggard D.J., Klenner W., Vyse A., Windthrow following four harvest treatments in an Engelmann spruce – subalpine fir forest in southern interior British Columbia, Canada, *Can. J. For. Res.* 29 (1999) 1547–1556.
- [27] Jactel H., Ménassieu P., Raise G., Infestation dynamics of *Dioryctria sylvestrella* (Ratz.) (Lepidoptera : Pyralidae) in pruned Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), *For. Ecol. Manage.* 67 (1994) 11–22.
- [28] Jolivet C., Arrouays D., Andreux F., Lévêque J., Soil carbon dynamics in cleared temperate forest spodosols converted to maize cropping, *Plant Soil* 191 (1997) 225–231.
- [29] Lemoine B., Growth and yield of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): the average dominant tree of the stand, *Ann. Sci. For.* 48 (1991) 593–611.
- [30] Lohmander P., Helles F., Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter, *Scand. J. For. Res.* 2 (1987) 227–238.
- [31] Milne R., Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*, *Tree Physiol.* 9 (1991) 383–399.
- [32] Moore J.R., Differences in maximum resisting bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types, *For. Ecol. Manage.* 135 (2000) 63–71.

- [33] Neild S.A., Wood C.J., Estimating stem and root-anchorage flexibility in trees, *Tree Physiol.* 19 (1999) 141–151.
- [34] Nielsen C.Ch.N., Will traditional conifer tree breeding for enhanced stem production reduce wind stability?, *Silvae Genet.* 41 (1992) 307–318.
- [35] Oswald H., Aussenac G., Stabilité des peuplements et traitements sylvicoles sur les sols hydromorphes, in: INRA-Bordeaux (Ed.), Conditions et effets des excès d'eau en Agriculture, Bordeaux, 1988, pp. 145–157.
- [36] Pardé J., Bouchon J., Dendrométrie, ENGREF, Nancy, 1988, 328 p.
- [37] Peltola H., Kellomaki S., A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pine at stand edge, *Silva Fenn.* 27 (1993) 99–111.
- [38] Petty J.A., Worrell R., Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow, *Forestry* 54 (1981) 115–128.
- [39] Porté A., Bosc A., Champion I., Loustau D., 2000. Estimating the foliage biomass and area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 73–86.
- [40] Putz F.E., Phyllis D.C., Lu K., Montalvo A., Aeillo A., Uprooting and snapping of trees: structural determinants and ecological consequences, *Can. J. For. Res.* 13 (1983) 1011–1020.
- [41] Quine C.P., Coutts M., Gardiner B.A., Pyatt G., Forests and wind: Management to minimise damage, *Forestry Commission Bulletin* 114, 1995, 24 p.
- [42] Raynor G.S., Wind and temperature structure in a coniferous forest and a continuous field, *For. Sci.* 17 (1971) 351–363.
- [43] Riou-Nivert P., Plantations à très grands écartements, Institut pour le Développement Forestier, Paris, 1981, 284 p.
- [44] Rondeux J., La mesure des arbres et des peuplements forestiers, Lavoisier, Paris, 1994, 521 p.
- [45] Rouvinen S., Kuuluvainen T., Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest, *Can. J. For. Res.* 27 (1997) 890–902.
- [46] Ruel J.-C., Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies, *For. Ecol. Manage.* 135 (2000) 169–178.
- [47] Silva G., Ruel J.C., Pin D., Influence de quelques défauts externes sur la stabilité des arbres face à une simulation mécanique de l'action du vent, *Can. J. For. Res.* 28 (1998) 123–131.
- [48] Slodicak M., Thinning regimes in stands of Norway spruce subjected to snow and wind damage, in: Coutts M.P., Grace J. (Eds.), *Wind and Trees*, Cambridge University Press, 1995, pp 436–447.
- [49] Smith V.G., Watts M., James D.F., Mechanical stability of black spruce in the Clay Belt region of northern Ontario, Canada, *Can. J. For. Res.* 17 (1987) 1080–1091.
- [50] Somerville A., Root anchorage and root morphology of *Pinus radiata* on a range of ripping treatments, *N.Z. J. For. Sci.* 9 (1979) 294–315.
- [51] Somerville A., Wind stability: forest layout and silviculture, *N.Z. J. For. Sci.* 10 (1980) 476–501.
- [52] Stokes A., Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement, in: Stokes A. (Ed.), *The supporting roots of trees and woody plants: form, function and physiology*, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 19–29.
- [53] Telewski F.W., Wind-induced physiological and developmental responses in trees, in: Coutts M.P., Grace J. (Eds.), *Wind and Trees*, Cambridge University Press, 1995, pp. 237–263.
- [54] Timell T.E., *Compression wood in Gymnosperms*, Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [55] Trichet P., Jolivet C., Arrouays D., Loustau D., Bert D., Ranger J., Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime, *Étude Gestion Sols* 6 (1999) 197–214.
- [56] Valinger E., Lundqvist L., Bondesson L., Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics, *Forestry* 66 (1993) 249–260.
- [57] Wilson J.S., Oliver C.D., Stability and density management in Douglas-fir plantations, *Can. J. For. Res.* 30 (2000) 910–920.

II - 2 Influence de la gestion sylvicole sur la sensibilité au vent des peuplements forestiers monospécifiques et équiennes

II - 2.1 Observations complémentaires sur les dégâts

Outre l'état de l'arbre (Figure II - 1a) tel que défini par le protocole d'inventaire de dégâts de tempête, une notation de contrainte, correspondant à la situation de l'arbre relative aux arbres voisins, a également été notée (Figure II - 1b) :

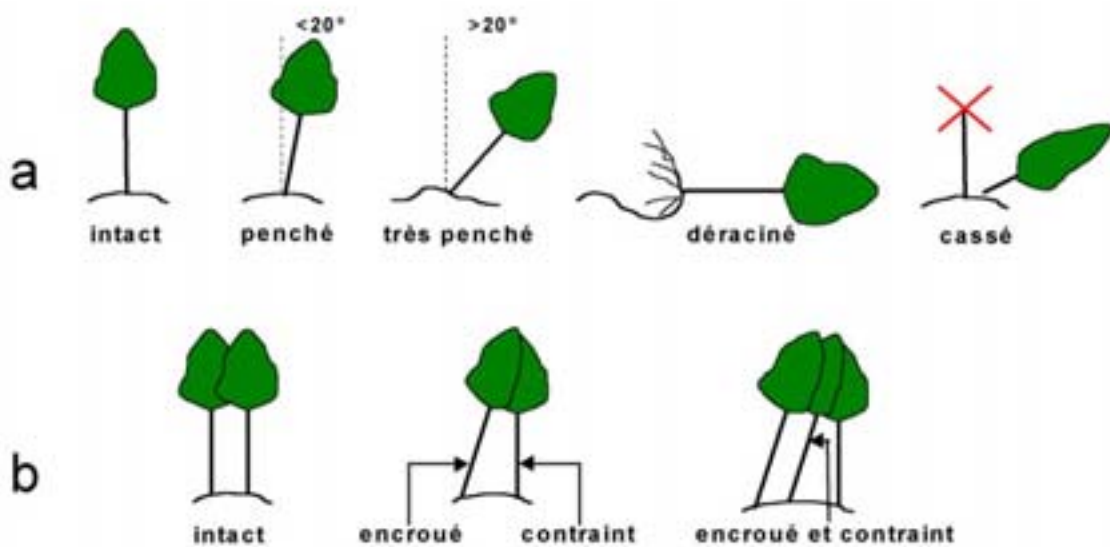


Figure II - 1 : Notations de dégâts de tempête définies par le protocole commun INRA- AFOCEL - CPFA - ONF d'inventaire des dégâts ; a) état de l'arbre, b) contrainte de l'arbre.

Les observations de dégâts montrent que les pins penchés étaient peu souvent encroués, et que l'effet "château de carte" était très peu marqué. En revanche, les arbres très penchés étaient le plus souvent encroués, on peut penser qu'il auraient été chablis si un voisin ne les avait pas retenus. Un second inventaire a été effectué six mois après le premier. La majorité des pins notés au premier inventaire comme "très penché" s'étaient totalement déracinés, devenant chablis.

La direction de chute a été notée sur les arbres déracinés de Saint Alban. Elle englobe une large gamme d'azimuts (Figure II - 2), qui peut être expliquée à la fois par des changements de direction des vents responsables des dégâts, et par une rotation de l'arbre par rapport à la direction de la force appliquée.

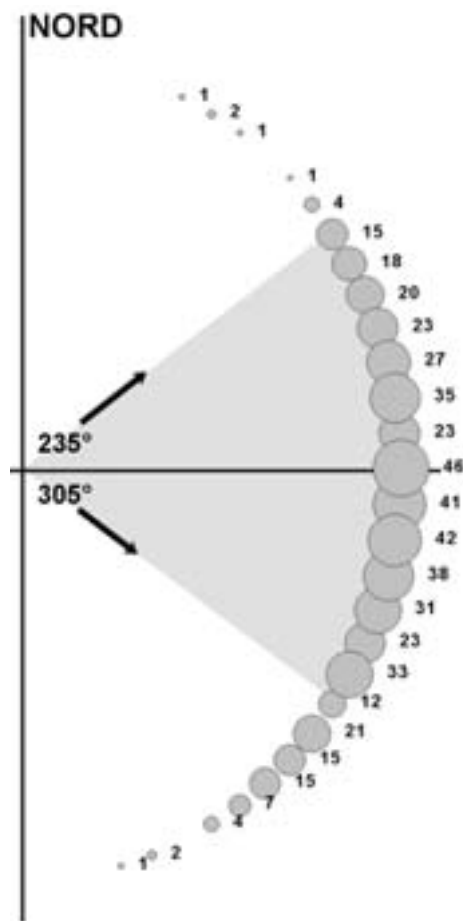


Figure II - 2 : Répartition de l'orientation de chute des pins chablis répertoriés sur la parcelle Saint Alban. Chaque cercle représente une valeur d'azimut associée à un effectif (nombre). Lors du 27 décembre 1999, la direction de provenance du vent a été enregistrée entre 235 et 305° (aire grisée, données météorologiques enregistrées sur le site expérimental du Bray, Unité EPHYSE).

II - 2.2 Indications sur les caractéristiques pédologiques du dispositif "Saint Alban"

Sur l'ensemble du dispositif expérimental âgé de 50 ans, 503 systèmes racinaires ont été mis à nus par la tempête de 1999. Ces plaques racinaires ont fait l'objet des mesures de dimensions telles qu'exposées dans l'article n°1, mais aussi d'observations complémentaires, relatives aux conditions de sol de la parcelle :

- Le pourcentage d'aliôs présent sur la surface de la plaque (estimé à vue, à 5% près) ; dans 83% des cas, il est estimé supérieur à 80%.
- La mesure de la profondeur maximale d'enracinement, égale ou supérieure à l'épaisseur de la plaque lorsque les racines ont percé la couche d'aliôs. Elle est en moyenne de 85 ± 20 cm, avec un maximum à 145 cm et un minimum à 30 cm. Entre des classes de

profondeur allant de 10 cm en 10 cm, la répartition des plaques est normale, avec 65% des plaques enracinées au plus profond entre 60 et 100 cm.

Ces observations confirment la présence relativement homogène d'un horizon aliosique induré à faible profondeur sur l'ensemble du site ; la végétation adventice indique une lande humide à mésophile. La profondeur d'ancrage est faible pour des arbres de 50 ans de hauteur moyenne égale à 24 m (± 1.5 m).

II - 2.3 La densité et la stabilité au vent des peuplements

La densité de peuplement est l'un des facteurs principaux liés à la sensibilité au vent des forêts (Somerville 1980, Krasowski *et al.* 1996, Peltola 1996). Certains types de sol, par la présence d'un horizon trop compact à faible profondeur, ou par la remontée saisonnière de la nappe phréatique comme c'est le cas dans cette étude, induisent un ancrage superficiel des arbres. Au delà d'une certaine taille, les peuplements sont alors particulièrement sensibles au déracinement, et une densité forte semble améliorer leur résistance globale (par exemple, Smith *et al.* (1987) sur *Picea mariana* et Harrington et DeBell (1996) sur *Populus trichocarpa*). En revanche, lorsque l'ancrage des arbres est plus profond et que leur résistance à l'arrachage est bien supérieure, le fort élancement des arbres poussant à forte densité favorise la casse des tiges par rapport à des peuplements plus clairs.

Comme dans les études précédemment citées, les résultats de l'article nous laissent supposer que cette meilleure résistance à la charge du vent est due à une dissipation plus importante de l'énergie transmise par le vent par contact entre houppiers, comme suggéré par Moore et Maguire (2004) et une pénétration moindre dans le couvert. L'entrelacement de plaques racinaires voisines, parfois évoqué dans la bibliographie, et que nous avons observé sur le terrain, peut également améliorer cette résistance. De même, la densité favorise l'anastomose entre racines d'individus différents, comme montré par Kulla et Lohmus (1999) sur *Picea abies*.

Ce phénomène de résistance "collective" est abordé par Groome (1988) sous le terme de "support mutuel", dont il donne une méthode de mesure et qu'il recommande de conserver tout au long de la croissance de l'arbre afin de limiter l'augmentation du risque de vent. Dans l'hypothèse de ce "support mutuel", il aurait été utile de pouvoir disposer de la position relative des pins au sein d'une placette, afin d'apprécier par exemple les possibilités de contact entre houppiers. Ainsi la densité n'est peut-être pas la variable la plus appropriée pour évaluer ce "support mutuel" : il serait plus indiqué d'utiliser l'espacement réel entre les arbres. Ces informations auraient notamment pu nous éclairer sur la forte variabilité de dégâts des placettes les moins denses, où les pins n'étaient pas répartis uniformément.

Cette variabilité est liée, sur ces placettes, à la disparition de la résistance "collective" au profit de la résistance individuelle. Or la résistance individuelle des arbres peut être altérée par de nombreux facteurs : dissymétrie du houppier ou du système racinaire, défauts dans le bois, pathogènes. Elle est avantagée par un faible élancement (Petty et Worrell 1981, Cremer *et al.* 1982, Putz *et al.* 1983, Petty et Swain 1985). La participation du poids au renversement chez un arbre trapu est inférieure à celle d'un arbre moins lourd mais plus élancé, car ce dernier courbe plus au vent (Coutts 1986). Par conséquent, selon la densité de peuplement, ou l'espacement entre individus, l'échelle des facteurs de résistance à considérer sera différente.

Dans la bibliographie, l'effet de la densité de peuplement sur la sensibilité au vent est abordé en considérant cette densité de façon instantanée, mais aussi par son obtention au travers des éclaircies. Les peuplements âgés très denses sont le plus souvent considérés comme des peuplements peu stables : une éclaircie sur de tels peuplements entraîne une brusque diminution de leur résistance au vent (Cremer *et al.* 1982, Coutts 1983, Savill 1983). L'éclaircie fragilise le peuplement en exposant au vent des individus non adaptés aux sollicitations mécaniques, comme observé par exemple par Urban *et al.* (1994) sur *Picea glauca*, tout en augmentant la charge du vent sur les arbres. L'intensité de cette fragilisation dépend :

- i) du type d'éclaircie pratiquée. Systématique, elle augmente la rugosité du couvert, sélective par le haut, elle conserve les individus les moins résistants mécaniquement, notamment pour la casse (Valinger *et al.* 1994). L'éclaircie sélective par le bas, comme pratiquée pour le Pin maritime dans les Landes de Gascogne, semble la plus indiquée pour la stabilité du peuplement (Cremer *et al.* 1982). Selon Gardiner *et al.* (1997), la densité finale et la rugosité obtenues conditionnent l'intensité de la fragilisation. Lohmander et Helles (1987) montrent par ailleurs que la probabilité de dégâts est négativement corrélée au temps écoulé depuis la dernière éclaircie.
- ii) de la date de l'éclaircie par rapport à l'âge du peuplement. Plus les éclaircies seront tardives, plus la fragilisation sera importante, car l'âge du peuplement détermine sa réactivité aux nouvelles conditions qui lui sont imposées (Wilson et Oliver 2000).
- iii) de la durée écoulée entre chaque éclaircie. Un intervalle de temps long implique une déstabilisation plus forte du peuplement à chaque éclaircie comparé à une conduite sylvicole plus dynamique. Un intervalle de temps court implique un déséquilibre moins fort mais répété du peuplement.

Chaque éclaircie représentant une prise de risque, Cremer *et al.* (1982), Savill (1983), Quine *et al.* (1995), Valinger et Fridman (1997) recommandent de planter le moins dense possible

pour obtenir des arbres plus trapus, adaptés au vent, mieux développés au niveau racinaire, une limitation des interventions d'éclaircie, ainsi qu'une durée de révolution plus courte (croissance plus rapide) afin de limiter le risque de tempête au cours de la vie du peuplement. *A contrario*, les peuplements denses et âgés seront plus difficiles à manipuler sans une prise de risque importante (Wilson et Oliver 2000) pour toutes les raisons exposées précédemment.

Dans notre étude, la densité des différentes placettes est obtenue par la variation d'intensité des éclaircies pratiquées. La dernière éclaircie sur les dispositifs expérimentaux remontant à 25 à 30 ans plus tôt, elle n'influence plus la sensibilité au vent des parcelles en terme d'ouverture du couvert et d'adaptation des arbres. Cependant ces éclaircies ont un impact sur la stabilité parce qu'en modifiant l'environnement de l'arbre, elles influencent sa croissance via i) la compétition pour l'eau, les nutriments et la lumière et ii) le stress mécanique (par exemple, Myers (1963), Kozłowski et Pallardy (1997)). Gardiner *et al.* (1997) montre en effet que dans les peuplements uniformes le moment de flexion appliqué à l'arbre augmente linéairement avec l'espacement entre les arbres. Par la croissance, les éclaircies agissent sur la forme des arbres proprement dite. D'après Muhairwe (1994), les variations de forme sont induites essentiellement par la longueur du houppier, elle-même reliée à la densité du peuplement. Comme Telewski (1995), Mitchell (2000) montre sur *Picea sitchensis* et *Pseudotsuga menziesii* que l'éclaircie induit un ré-équilibre de l'élancement des arbres par une croissance adaptative : diminution temporaire de la croissance en hauteur, augmentation de la croissance radiale et de l'allocation basale. Cette augmentation est provoquée en partie par l'accroissement des sollicitations mécaniques induites par le vent. Ce ré-équilibre est plus marqué sur les arbres initialement plus élancés.

II - 2.4 L'influence de la position sociale de l'arbre sur l'endommagement

Le type de dégât varie selon la position sociale des pins. A 50 ans, en faible densité, les chablis sont des pins dominés. Ce dernier résultat rejoint l'hypothèse de la prédominance de la résistance individuelle en faible densité. Au contraire, dans les placettes les plus denses sur les peuplements de 20 et 50 ans, les chablis sont les individus dominants. En règle générale, les arbres dominants sont considérés comme les plus sensibles au vent au sein du peuplement à cause de leur hauteur et de leur prise au vent plus importantes. En réalité, les facteurs individuels de sensibilité au vent d'arbre en peuplement semblent être dépendants de la position sociale de l'individu et de la densité. Galinski (1989) a montré en utilisant un

modèle de prédiction du risque basé sur *Pinus sylvestris*, que l'élancement de la tige était significatif comme facteur de risque chez les arbres dominants, mais pas chez les dominés.

D'après Nielsen (2002) (sur *Picea abies*), si la dynamique de croissance aérienne influe sur la résistance individuelle au vent, la contribution des diverses composantes de l'ancrage semble également différente selon la position sociale de l'arbre. Ces composantes sont :

- la cohésion et le poids de la plaque racinaire, dépendants des conditions de sol, de la profondeur d'enracinement, de la densité de racines verticales, de la symétrie de la plaque racinaire dans son intégralité,
- le bras de levier créé par les racines sous le vent et le point de rotation de la plaque (masse, diamètre vertical, forme),
- les racines en tension : symétrie, masse, distribution spatiale. Chez les arbres groupés, la morphologie de ces racines est très différente par rapport aux arbres isolés. Cette symétrie est d'autant plus importante que le système racinaire est superficiel. Pour des systèmes type cœur ou pivot, le stress est distribué de façon plus homogène.

Le poids et la cohésion de la plaque jouent un plus grand rôle dans l'ancrage des arbres dominants, alors que chez les dominés, les composantes d'ancrage liées aux racines elles-mêmes sont plus importantes. Pour des arbres isolés, la composante "propriétés des racines uniquement" joue un grand rôle, essentiellement sur les racines en tension.

Différents processus d'endommagement ont été observés dans cette étude, et séparés dans les résultats. La casse de la tige et le déracinement d'un arbre sont bien deux résultantes différentes. En revanche, il semble qu'un arbre penché et un arbre déraciné soient issus du même processus (l'ancrage a cédé avant la tige), mais que chez un arbre penché, la force n'aie pas été suffisante pour ruiner totalement l'ancrage : la partie intacte du système racinaire est encore suffisamment résistante (du moins provisoirement) pour retenir le poids de l'arbre, même si celui-ci a dépassé le point d'équilibre de masse. Ce résultat peut se rapprocher de la théorie d'ancrage de Nielsen (2002) selon la position sociale de l'arbre : dans les parcelles de forte densité, les arbres penchés présentent un plus petit DBH (Diamètre à 1.30 m) que les chablis. Cette inclinaison n'est pas liée pour la grande majorité des pins à une position de repos sur un voisin : l'inclinaison n'est pas directement liée à un empêchement des pins à tomber à cause du manque d'espace mais bien à un processus de destruction inachevé du système racinaire. Le second inventaire montre que l'endommagement des arbres suite à une tempête n'est pas seulement immédiat, mais se prolonge aussi dans le temps, par les atteintes sur le système racinaire et par les attaques liées aux parasites de faiblesse. Les déracinements observés dans les mois suivants le

premier inventaire peuvent notamment être lié à des coups de vent entraînant la ruine d'arbres à l'ancrage fragilisé. Cela a une implication pour le sylviculteur, qui doit exploiter non seulement les individus chablis mais également les individus encore debout qu'il estime trop atteints.

II - 2.5 La fertilisation et l'amélioration génétique

Contrairement au résultat exposé dans l'article, diverses études montrent une diminution de la stabilité au vent des arbres sur parcelles fertilisées (Barker (1978) sur *Pinus radiata*, Laiho (1987) et Hirvela et Hynynen (1990) sur *Pinus sylvestris*). De même, sur *Pinus pinaster*, Lefrou (1979) a constaté une sensibilité au vent plus importante après un apport phosphaté, ainsi que Stokes *et al.* (1997) après une fertilisation NPK sur *Picea sitchensis*. Dans notre étude, la diminution des dégâts sur les placeaux de faible densité fertilisés par rapport aux placeaux témoins de même densité peut être expliquée principalement par la meilleure "fermeture" du couvert sur ce type de placeau, augmentant le contact entre houppiers et améliorant le soutien mutuel. D'après Trichet dans (Najar 2002), la fertilisation (N, P, K Ca, Mg, oligo-éléments) a augmenté les dégâts provoqués par la tempête de 1999 sur des placettes de Pin maritime de 8 ans. Le même auteur montre que ce type de fertilisation, appliqué chaque année, induit un fort développement des parties aériennes, par accroissement du nombre de branches et d'aiguilles. La charge du vent a donc été plus forte sur ces pins, mais sans support mutuel, le couvert n'étant pas fermé à cet âge. Dans notre étude, la fertilisation phosphatée a accru le déséquilibre entre biomasse aérienne et racinaire. La partie réceptionnant la charge du vent est donc disproportionnée par rapport à la partie assurant la résistance de l'ancrage. Au delà du rapport biomasse aérienne/biomasse racinaire, on peut se demander si la fertilisation peut affecter la stabilité au vent par son influence sur la forme de la tige, sur l'architecture aérienne en influençant l'amortissement des oscillations de l'arbre au vent, sur la résistance de la tige à la rupture en influençant la formation des cernes.

Comme la fertilisation, l'amélioration génétique induit un gain en volume de tige. Cependant, d'après Nicoll *et al.* (1995), elle n'entraîne pas d'augmentation du rapport biomasse aérienne/biomasse racinaire pour de jeunes *Picea sitchensis*. Les mêmes auteurs indiquent que ce rapport est en réalité peu indicatif de la stabilité de l'arbre si la souche (partie du système racinaire sous le collet ne comprenant pas les racines latérales) est prise en compte dans la biomasse racinaire, cette partie étant peu impliquée dans l'ancrage. Or le rapport aérien/(racines-souche) semble être un caractère héritable. Dans notre cas, l'amélioration

génétique, réalisée sur des critères de hauteur, n'a pas eu d'effet sur la résistance au vent dans les placettes normalement denses, le gain en volume de tige restant faible.

II - 2.6 Conclusion

Les précédentes réflexions montrent que la résistance globale des forêts face au vent doivent être considérés selon deux échelles imbriquées, le niveau "arbre" et le niveau "peuplement" ; Nielsen (2002) souligne d'ailleurs cette nécessité de considérer la gestion du risque lié au vent aux échelles régionale, locale, parcellaire et individuelle. La "cohésion" spatiale du peuplement détermine alors l'échelle des facteurs indicatifs à considérer pour évaluer leur sensibilité au vent. De plus, selon la position sociale de l'arbre, ces facteurs, et notamment le facteur d'élancement, peuvent ne pas avoir la même importance.

Le caractère expérimental de ces dispositifs présente deux avantages principaux. Tout d'abord, les études d'observation de dégâts concernent souvent des peuplements forestiers hétérogènes en terme de sylviculture, et par conséquent non comparables. Or les caractéristiques du peuplement influencées par la sylviculture et intervenant dans la résistance au vent sont nombreuses, et interagissent de façon complexe. Les effets de facteurs sylvicoles sont alors difficilement interprétables. *A contrario*, les effets sylvicoles croisés appliqués sur dispositifs expérimentaux, et mis en place au départ pour une étude donnée, ont pu être utilisés dans l'étude de la stabilité au vent. Le second avantage de ces parcelles réside dans la connaissance de leur parcours sylvicole. Les caractéristiques de la parcelle forestière à la date de l'événement sont la résultante de son historique, leur sensibilité au vent est donc une intégration de cette histoire.

La conduite des peuplements à long terme afin de réduire le risque lié au vent implique la mise en place de bases de données des dégâts de tempête enregistrées sur la région considérée. Ce type d'étude reste donc indispensable, i) par la trace historique qu'elle représente, ii) par les possibilités d'exploitation permettant la création de modèles statistiques sur une zone géographique forestière définie, iii) comme source d'informations pour la validation de modèles de prédiction du risque élaborés de façon déconnectée à ces observations *in situ*, tels que les modèles mécanistes.

Ces modèles nécessitent une phase expérimentale afin d'évaluer la résistance de l'ancrage dans les conditions et la zone considérées.

Chapitre III

Expérimentation *in situ* de l'ancrage racinaire

Ce chapitre aborde l'ancrage racinaire du Pin maritime étudié à l'aide d'essais de flexion en statique. L'ancrage a été caractérisé en fonction i) des principales conditions pédologiques rencontrées sur le massif forestier des Landes de Gascogne, et particulièrement la présence d'un horizon d'aliol induré, et ii) l'exposition des arbres aux vents dominants d'Ouest ; ces deux facteurs sont susceptibles d'influencer la qualité de l'ancrage des pins.

A la suite de la publication, des résultats complémentaires permettront d'aborder plus en détail le comportement d'endommagement des pins en fonction de la pédologie des sites, de l'exposition au vent et de l'âge des arbres.



Photo de gauche : grimpage d'un pin de lisière de 50 ans testé sur le peuplement "Callen" (40) en lande sèche (avril 2002). Photo de droite : mesures de défilement de la tige après l'essai, sur un pin interne de 29 ans, à Luë (40), lande humide (février 2003).

Sommaire
- Chapitre III -
Expérimentation *in situ* de l'ancrage racinaire

III - 1 Ancrage racinaire du Pin maritime selon différentes conditions de sol et d'exposition aux vents dominants - Article paru dans <i>Trees - Structure and Function</i>	43
III - 2 Le comportement d'endommagement du Pin maritime dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne	44
III - 2.1 Le principe de la méthode d'essais de flexion en statique	44
III- 2.2 La caractérisation pédologique des parcelles d'expérimentation	44
III - 2.3 Le comportement mécanique du Pin maritime à l'arrachage	47
III - 2.4 L'observation de la morphologie des plaques racinaires	52
III - 2.5 Conclusion de cette étude d'ancrage	55

III - 1 Ancrage racinaire du Pin maritime selon différentes conditions de sol et d'exposition aux vents dominants - Article paru dans *Trees - Structure and Function*

Résumé de l'article Des essais de flexion en statique poussés jusqu'à la ruine ont été réalisés afin de déterminer la résistance mécanique du Pin maritime au renversement. Les peuplements, situés sur sol podzolique, ont été sélectionnés selon deux stations forestières : la lande humide, caractérisée par une nappe d'eau à faible profondeur et un horizon induré d'aliôs, et la lande sèche, où la nappe se situe plus en profondeur et où l'horizon aliôsique est absent ou fragmenté. Cet horizon induré limitant la croissance verticale des racines, la résistance de l'ancrage a été étudiée en fonction de la présence ou de l'absence d'aliôs sous chaque pin testé. Le comportement mécanique de pins situés au sein du peuplement et de pins situés sur la bordure exposée aux vents dominants a également été comparé.

Le moment critique de renversement ($TM_{crit, total}$) à la base de la tige est positivement corrélé à la variable volumique ($H \times DBH^2$) (H : hauteur totale de l'arbre, DBH : diamètre à 1.30 m). Les analyses de covariances effectuées sur les régressions linéaires ont montré que la présence de l'aliôs n'a pas d'effet significatif sur la résistance de l'ancrage. Cependant, la casse de la tige intervient dans 82% des cas sur lande sèche lorsque ($H \times DBH^2$) est inférieur à $1m^3$. Ce résultat peut indiquer un meilleur ancrage sur ce type de station. Sur un sol présentant de l'aliôs, les pins de lisière présentent un ancrage plus résistant de 20% par rapport aux pins situés au sein du peuplement : la plaque racinaire des pins de lisière est deux fois plus large que celle des pins internes, et sa surface côté au vent est plus importante.

Véronique Cucchi · Céline Meredieu · Alexia Stokes ·
Stéphane Berthier · Didier Bert · Mohamed Najar ·
Alain Denis · Roland Lastennet

Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster*Ait.) growing in different podzolic soil conditions

Received: 18 July 2003 / Revised: 17 February 2004 / Accepted: 25 February 2004 / Published online: 14 April 2004
© Springer-Verlag 2004

Abstract Static winching tests were carried out in order to determine the mechanical resistance of Maritime pine to overturning. The tested stands were selected according to podzolic soil conditions: “wet Lande”, characterised by a shallow ground water table and a hard pan horizon, and “dry Lande”, with a deeper ground water table and a hard pan absent or broken up. As this soil horizon limits the vertical growth of tree roots, anchorage resistance was investigated with regards to the presence or absence of a hard pan underneath each tree. To determine if mechanical behaviour differed within a stand, trees from inside the stand and edge trees at the border exposed to prevailing winds were also tested. The critical turning moment ($TM_{crit,total}$) at the base of the stem was positively related to the variable ($H \times DBH^2$) (H , total tree height; DBH , tree

diameter). Linear regression analyses between $TM_{crit,total}$ and ($H \times DBH^2$) showed that the presence of a hard pan had no significant effect on anchorage resistance in uprooted trees. Stem failure occurred for 82% of trees on dry Lande when ($H \times DBH^2$) < 1 m³. Moreover, stem failure type on dry Lande indicated that trees were better anchored. On soil with a hard pan, edge trees were found to be 20% more resistant to overturning than inner trees. Edge trees differed from inner trees in that the soil-root plate was two times larger and also possessed a larger surface area on the windward side.

Keywords Root anchorage · Winching test · Tree stability · Critical turning moment · Wind loading

V. Cucchi · C. Meredieu (✉) · D. Bert
Unité EPHYSE, Institut National de la Recherche
Agronomique (INRA),
69 route d’Arcachon,
33 612 Cestas Cedex, France
e-mail: celine.meredieu@pierroton.inra.fr
Tel.: +33-5-57122861
Fax: +33-5-56680546

A. Stokes · S. Berthier
Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, UMR CNRS-
INRA-Université Bordeaux I,
69 route d’Arcachon,
33 612 Cestas Cedex, France

Present address:

S. Berthier
Forest Research, Northern Research Station,
Roslin, Midlothian, Scotland EH259SY

M. Najar
AFOCEL Station Sud-Ouest, Domaine de Sivaillan,
Les Lamberts,
33 480 Moulis en Médoc, France

A. Denis · R. Lastennet
Centre de Développement des Géosciences Appliquées,
Université Bordeaux I,
Avenue des Facultés,
33 405 Talence Cedex, France

Introduction

A fast growing timber species, Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) is intensively cultivated in over 890,000 ha of monospecific stands in southwest France (IFN, Inventaire Forestier National Online, <http://www.ifn.fr/>; accessed 25 June 2003; French departments of Landes and Gironde). Although making up only 7% of French forests, Maritime pine accounts for 16% of national pulp and wood production. The 1999 hurricane was the most violent storm known since the establishment of this cultivated forest at the beginning of the nineteenth century. The northernmost part of the range was devastated, resulting in estimated losses of 26.1 million m³ of wood, i.e. 3.5 years of harvest (IFN, communication from the updated fourth Gironde and Landes inventory). French forest research is now concentrating on how to better manage forest stands susceptible to wind damage. Hence, the present study aims to characterise the anchorage resistance of Maritime pine.

The efficiency of tree root anchorage is closely linked to the structure and characteristics of the soil conditions. Soil structure can also affect greatly the rooting depth, which is a consequential part of the anchorage strength (Fraser 1962; Stone and Kalisz 1991; Ray and Nicoll 1998). Most

damage resulting from the 1999 storm was due to the uprooting of trees, rather than from stem breakage. Soil characteristics in this region do not permit an optimised root anchorage for Maritime pine. A hard pan horizon often limits the vertical growth of roots, resulting in the formation of shallow root systems. This horizon could be fairly regular but also broken or absent with local depth variations. A broken hard pan therefore allows a deeper penetration of the root system. Tree resistance to uprooting depends on root system morphology and also on the ability of individual roots to adapt to wind loading (Nicoll and Ray 1996; Stokes and Guitard 1997; Stokes et al. 1998). Stokes et al. (1998) and Stokes (1999) showed that the adaptation of root systems to mechanical stress due to wind loading can occur in Maritime pine and that failure mode depends on age in young trees. However, no information has been collected to date on the mechanical behaviour of older trees or trees growing in various conditions.

Anchorage strength of trees has been characterised by several authors using a static tree-pulling method (Coutts 1986; Smith et al. 1987; Fredericksen et al. 1993; Ray and Nicoll 1998; Moore 2000; Peltola et al. 2000). From these tests, the critical turning moment needed to uproot or break the tree was calculated and related to tree size variables, e.g. stem weight (Fraser 1962; Somerville 1979; Papesch et al. 1997; Gardiner et al. 2000; Meunier et al. 2002). This critical turning moment allows comparisons between species due to their different mechanical behaviour (Savill 1983; Peltola et al. 2000), which could be explained by stem characteristics, e.g. taper (Meunier et al. 2002) or root system architecture and anchorage strength (Stokes 1999). Even if this method does not really simulate wind loading due to the lack of dynamic sway (Oliver and Mayhead 1974; Gardiner et al. 1997), there seems to be no differences in the type of damaged roots between winched or windblown trees (Coutts 1983).

By carrying out winching tests on a wide range of Maritime pine trees, the most effective relationship predicting the critical turning moment for Maritime pine was modelled. Using this relation, the mechanical resistance was investigated according to (i) podzolic soil conditions found in the “Landes de Gascogne” region by comparing trees growing in soil with a hard pan or not, and (ii) exposure to wind by comparing trees growing on the western border of a stand (edge trees) with those growing inside the stand (inner trees).

Materials and methods

Study sites

The “Landes de Gascogne” region is located in SW France. Mean annual precipitation is 990 mm (1971–2000 data, Météo-France, Météo France Accueil, <http://www.meteo.fr/meteonet/>; accessed 25 June 2003), occurring mainly in winter and spring months. In this flat region, prevailing winds are from the west to north-west, with a mean wind-speed of 3.3 m s^{-1} (Stokes 1999). The soil is a sandy podzol (Trichet et al. 1997).

Two types of Lande depending on several soil properties are observed (Jolivet et al. 1997; Trichet et al. 1997):

- The “wet Lande” is characterised by a shallow ground water table and a hard pan horizon at a depth of 0.5–1.0 m. This horizon, formed by winter water logging, is fairly regular. Wet Lande understorey is mainly represented by *Molinia coerulea* and *Ulex nanus*, or by *Pteridium aquilinum*.
- The “dry Lande” is characterised by a deeper ground water table and by a hard pan absent or broken up. Dry Lande understorey consists mainly of *Calluna vulgaris*, *Erica cinerea* and *Halimium lasianthum* subsp. *alyssoides*.

Seven even-aged study stands were chosen and classified, four in wet Lande and three in dry Lande, with tree age and size varying from stand to stand (Table 1). When choosing a stand, one of the criteria was that the western edge had to be exposed to prevailing winds, i.e. any neighbouring stand upwind of the western border was shorter than mid-height of the stand studied.

Sampled trees

In order to compare root anchorage, trees on the western border (edge trees) and trees growing inside the stand (inner trees) were selected. Edge trees were chosen on the western border and exposed to prevailing winds, in order to test the hypothesis that they are better adapted to wind loading, and thus more resistant to overturning (Nicoll and Ray 1996; Stokes and Guitard 1997). Trees were selected to represent all the diameter at breast height classes (DBH) in the stand (Table 1). Therefore, these samples represented a wide range of size classes found in Maritime pine forests in SW France. Maritime pine stems are often leaning or flexuous. As it was too difficult to take this flexuosity into account, with regards to tree mechanical behaviour, only straight and leaning trees were chosen. When leaning trees were selected, it was ensured that they leaned in the direction of the prevailing wind (SE). Tree stems were neither forked nor with any other apparent stem defects.

The tree-pulling tests showed that the type of Lande was not sufficient to characterise the differences in anchorage. The vertical growth of tree roots is mainly inhibited by the hardened iron pan horizon and even in dry Lande the hard pan could be present at a shallow depth. Therefore, uprooted trees were classified into two types, depending on the presence of a hard pan and its depth. It was observed that, at the hard pan level, vertical root growth was arrested, as roots were unable to penetrate deeper into the soil. Consequently, the soil-root plate was flat at this level. In such a case, the classification was based on the presence of this flat zone in the soil-root plate. Trees were classified as “with a hard pan” or “without a hard pan”.

Winching tests

In order to determine tree resistance to overturning, 100 trees were winched sideways until failure in 2002 and 2003 (Table 1). The system was similar to that used by Coutts (1986), Papesch et al. (1997), Stokes (1999), Peltola et al. (2000), Moore (2000) and Meunier et al. (2002). A motorised winch (type Hit-Trac 16B, Habegger, Switzerland) was used, with a 16 kN maximal strength capacity. For the larger trees, a pulley was also used which doubled the winch capacity, and occasionally a 32 kN maximal strength capacity hand winch was employed. The winch was attached to the base of an anchoring tree at the longest possible distance to the winched tree, in order to obtain a small angle θ (Fig. 1). The nominal height of the cable attachment was 10–50% of the tree height (H), varying from tree to tree. This height was usually lower than one-third—a half of H used by Moore (2000) and Peltola et al. (2000). As we were studying root anchorage, the attachment height also had to be low enough on the stem to induce root failure instead of stem breakage. The tension applied to the winched tree was measured by a load cell (type K25H-50kN, K25H-20kN or M11-50kN, Scaime,

Table 1 Stand and tree characteristics. *Natural reg.* natural regeneration, *N/ha* stand density as trees per hectare, mean DBH and *H* of the stand were measured on a representative plot. *Nb* number of trees, mean tree DBH and *H* for all winched trees, with \pm standard error. In the D. France stand, one tree was prevented from falling due to the presence of a neighbouring tree

Study site	Winched trees characteristics												
	Type of Lande	Establishment	Age (years)	<i>N/ha</i>	Mean DBH (cm)	Mean <i>H</i> (m)	Nb inner	Nb edge	Nb uprooted	Nb broken	Month of winching	Mean DBH (cm)	Mean <i>H</i> (m)
D. France	Wet	Planting	15	1,133	17.6	11.3	12	8	15	4	March–April	18.1 \pm 2.9	11.3 \pm 1.2
Captieux	Dry	Seeding	20	945	19.6	15.2	18	0	4	14	May	18.0 \pm 2.6	14.7 \pm 1.4
Luë	Wet	Seeding	29	427	25.8	18.8	11	0	10	1	March	26.1 \pm 2.6	18.8 \pm 1.5
Eperville	Wet	Planting	31	94	35.3	20.8	6	1	6	1	March	38.4 \pm 6.0	20.9 \pm 1.3
Coyole	Dry	Natural reg.	47	260	36.2	21.4	7	6	11	2	January	26.7 \pm 3.8	19.6 \pm 2.1
Cameleyre	Wet	Seeding	49	383	39.7	23.2	6	7	13	0	January	34.1 \pm 7.2	21.4 \pm 1.6
Callen	Dry	Natural reg.	50	127	38.7	25.2	14	4	13	5	April	41.0 \pm 8.0	25.3 \pm 1.4

France) attached between the winch and the anchoring tree, and recorded every second using a data logger (type Almemo 2290-8, Ahlborn, Germany). In order to determine the deflection angle α of the tree during the winching test, two inclinometers were tied to the tree, one at the cable attachment point, and the other at the base of the stem. The latter allowed soil-root plate rotation to be taken into account. Measurements of angle were recorded every second with a second identical data logger, synchronised and simultaneously activated with the load cell data logger. The distance between the tested tree and anchoring point, as well as the H_{cable} were measured. The compass direction of winching was also noted.

Tree dimensions

Before winching, basal sweep was measured as the deviation (in centimetres) from verticality at 1.50 m height. Different tree dimensions were measured after winching. Relative crown length represents the distance between the first living branch and the stem terminal bud relative to the total height of the tree. Crown biomass corresponds to the total weight of all the living branches. Stem circumferences over bark at 1 m intervals were measured, avoiding any bulging whorls. Stem green wood density (wood and bark) was calculated using $Density = \frac{SectionWeight}{SectionVolume}$, with SectionVolume the volume of a 1 m long section of trunk cut from the middle of the stem and weighed. This density was assumed to be constant throughout the stem. Then, total stem weight was estimated using:

$$\text{Stem Weight} = \sum (\text{Section Volumes}) \times \text{Density}$$

Soil-root plate volume was calculated by measuring four radii of the plate as well as plate depth (Fig. 2). The soil-root plate area was calculated (Pardé and Bouchon 1988) and soil-root plate volume was considered equal to area \times depth, depth assumed as constant across the plate. This assumption is due to the homogeneity of the soil conditions for the rooting area. Asymmetries of the soil-root plate were considered as percentage of shift according to each axis $R1/R3$ (winching direction asymmetry) and $R2/R4$ (perpendicular winching direction asymmetry). This percentage is positive if the gravity centre (medium of each length $R1+R3$ and $R2+R4$) was above or on the right of the trunk location, e.g. on the figure the asymmetry is positive on the two axes. For each uprooted tree, presence of a tap-root was observed and noted.

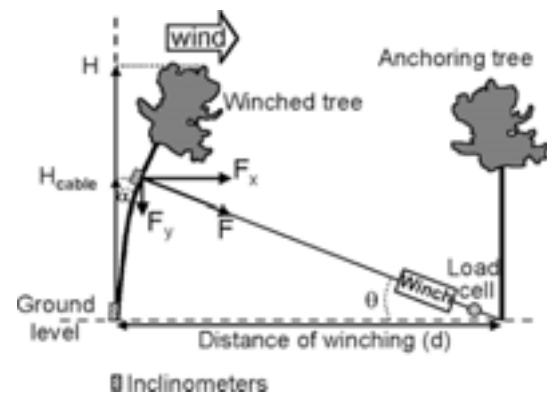


Fig. 1 Trees were winched sideways and the force necessary was measured using a load cell located between the winch and anchoring tree. Inclinometers were attached at the stem base and at the cable attachment height (H_{cable}) in order to measure stem deflection during winching

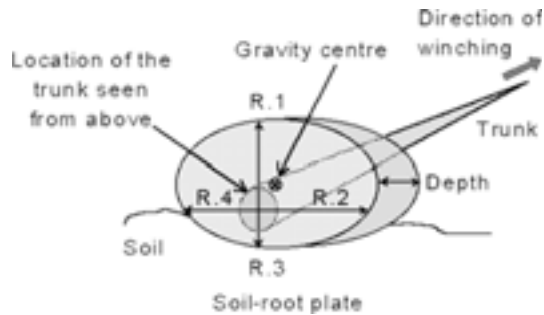


Fig. 2 Measurements of the soil-root plate on uprooted trees. The soil-root plate area and volume were calculated as described in the text

Determination of soil characteristics

Tree winching was carried out during the winter and spring months, when soil moisture was highest. After winching, several samples of soil between 150 and 200 cm³ in volume were removed from around and underneath the soil-root plate, in order to measure soil moisture. Each sample was immediately weighed, and then oven dried at 105°C until a constant mass was reached. Dry mass was then measured and percent weight loss calculated.

Soil mechanical properties were determined in the laboratory by carrying out a direct shear test on one to three of the previous soil samples sampled at 40 cm depth in each stand. A Casagrande shear box was used to measure soil shear strength and to evaluate the angle of internal friction. This test can be performed with both drainage and normal stress conditions and is especially efficient for measurements of sandy soil (Terzaghi and Peck 1967).

Calculation of critical bending moment

The force needed to cause failure of a tree was extracted from the recorded load cell data, associated with deflection values at the time of rupture. The critical turning moment applied at the stem base was calculated according to Young (1972):

$$TM_{\text{crit, applied}} = F_x \cos \alpha H_{\text{cable}} + F_y \sin \alpha H_{\text{cable}} \quad (1)$$

where F_x is the horizontal component and F_y the vertical component of the maximal applied force $F(N)$ and α the deflection angle of the trunk when the force is maximal. This angle was obtained from the values given by the inclinometers. F_x and F_y were deducted from the value of $F(N)$ and the cable angle θ , which was derived from the distance d between the tree winched and the anchoring tree, and the H_{cable} :

$$F_x = F \times \cos \theta \quad \text{and} \quad F_y = F \times \sin \theta \quad (2)$$

The total critical turning moment $TM_{\text{crit, total}}$ at the stem base adds the critical turning moment applied by the winch (1) to the critical turning moment $TM_{\text{crit, weight}}$ due to the force resulting from the overhanging weight of the leaning tree during winching. All the moments were positive as the trees were straight or leaning in the direction of winching. The weight of the winch and cable were neglected. $TM_{\text{crit, weight}}$ was calculated by resolving tree weight into stem and crown weights where the tree crown was taken as a whole and the tree stem as 1-m long sections stacked on top of each other.

$$TM_{\text{crit, weight}} = WG_x \quad (3)$$

where W is the weight in N and G_x is the final horizontal position of the centre of gravity at the middle of the crown or stem section. As tree displacement is small, the horizontal component of G could be

assimilated to the height of G on the stem multiplied by the sinus of the leaning angle given by inclinometers. For the crown and stem section above the cable attachment point, this angle corresponds to the angle measured at this point. Although Eqs. 1 and 2 assume the stem as a rigid cantilever, we wanted to take into account the stem lean below this point: leaning angle is an evolution in increments between the stem base angle and the attachment point angle. Stem section mass was deducted from the green wood density found for the tree and the stem section volume assumed to be a truncated cone form. Hence, $TM_{\text{crit, crown weight}}$ was directly obtained and $TM_{\text{crit, stem weight}}$ was the sum of all the moments of tree stem sections.

Data analysis

Using REG and GLM procedures of SAS software (SAS Institute, Cary, N.C., USA), we performed Pearson correlations between $TM_{\text{crit, total}}$ and the tree characteristics. The best relationship with $TM_{\text{crit, total}}$ was found by stepwise regression. Differences between regressions according to the presence of a hard pan and inner/edge position were tested by covariance analysis. We also carried out Ryan–Einoth–Gabriel–Welsch multiple range test, in order to investigate differences in dimensions between trees according to the presence of a hard pan and their position within a stand or at its edge.

Results

Among the 100 trees winched during this study, 51 trees were on wet Lande and 49 on dry Lande. Trees were mainly uprooted, and a total of 27 trees failed in the stem, with 21 broken trees on dry Lande (Table 1). Failure occurred at ground level for 14 trees, at 4–10% of the height of the lever arm for 9 others (mean failure height = $8.7 \pm 4.1\%$) and at 28 and 32%, respectively, for two trees. Failures differed notably between the type of Lande: in dry Lande, most failures resulted in numerous lengthwise splits with no movement of the soil-root plate, whereas breaks were cleaner in wet Lande, with movement of the soil-root plate also occurring. Only two stem failures, one in each type of Lande, showed a clean horizontal break indicating a defect in the wood.

Pearson correlations between tree characteristics and $TM_{\text{crit, total}}$ were carried out, including broken trees as if there were no differences compared to uprooted trees. Table 2 indicates the highly significant correlations obtained, all linked to tree size. If these variables were standardised by the tree size (DBH, DBH² or DBH³), then no relationship was significant. Correlations with basal sweep, asymmetries of the soil-root plate and soil moisture were not significant. Using stepwise regression, the variable $[H \times \text{DBH}^2]$ was found to be the best variable to explain the variability of $TM_{\text{crit, total}}$. A Durbin Watson test showed no correlation between errors.

A linear regression between $TM_{\text{crit, total}}$ and $(H \times \text{DBH}^2)$ allowed a comparison of the mechanical behaviour of root anchorage of Maritime pine according to podzolic soil conditions and exposure to wind (Fig. 3). The three regression intercepts were not forced through zero so as to not influence the slope values for the covariance analysis. Moreover, the intercept of the global regression was not significant. Regressions were weighted in order to assume

Table 2 Pearson correlation between tree characteristics and $TM_{crit, total}$. Only highly significant correlations are indicated, with regards to the correlation coefficient

Variables	<i>n</i>	Mean	<i>P</i> value	<i>r</i> ²
$(H \times DBH^2)$ (cm ³)	79	2,129,276	0.001	+0.94
DBH ³ (cm ³)	79	35,727	0.001	+0.94
Stem weight (kg)	79	633.8	0.001	+0.94
DBH (cm)	79	29.7	0.001	+0.90
Crown biomass (kg)	79	118.3	0.001	+0.90
Volume of the soil-root plate (m ³)	34	2.5	0.001	+0.82
<i>H</i> (cm)	79	191.3	0.001	+0.69
Depth of the soil-root plate (cm)	57	76.5	0.001	+0.59
Stem taper (<i>H</i> /DBH)	79	66.4	0.001	-0.48

the homogeneity of the residuals at 0.05 level (Levene test) and compare the two slopes according to soil conditions. The value of each point was weighted by the $(H \times DBH^2)$ classes. Covariance analysis showed no effect of the presence of a hard pan on $TM_{crit, total}$ ($P=0.745$, $n=45$) but did show a significant effect of inner/edge position on $TM_{crit, total}$ ($P=0.018$, $n=55$). Intercepts were significant only for trees growing on soil with a hard pan ($P<0.001$ for both inner and edge trees).

For trees growing without a hard pan, the prediction of $TM_{crit, total}$ is only effective above a $(H \times DBH^2)$ of 1 m³, with stem failure happening in 82% of trees when $(H \times DBH^2) < 1$ m³, even though the H_{cable} was equal to only 10% of tree height. For such trees growing on this type of soil, winching tests should therefore be carried out only when $(H \times DBH^2) > 1$ m³ if investigating $TM_{crit, total}$.

Certain characteristics of the soil-root plates or tree characteristics were related to $TM_{crit, total}$ residuals in order to explain the residual variability of anchorage resistance. No significant correlations were found.

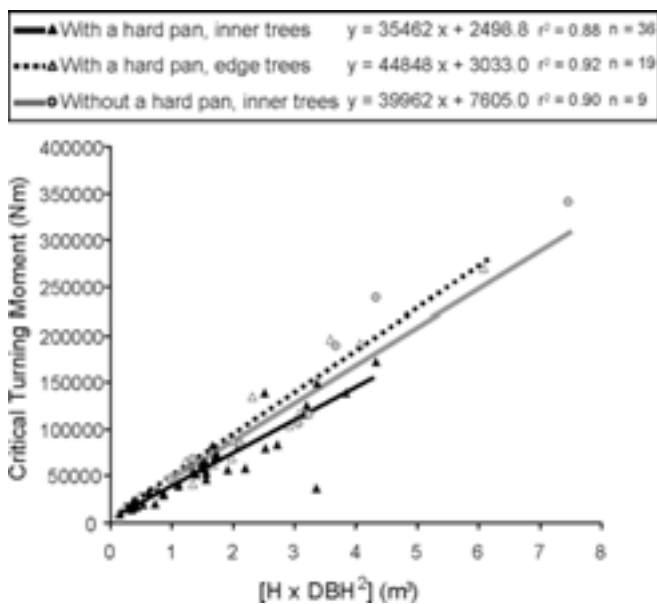


Fig. 3 Relationships between $TM_{crit, total}$ and stem form $(H \times DBH^2)$. Lines show weighted regressions not forced through zero

Comparisons of tree dimensions were also made according to soil conditions and exposure to wind (Table 3). Relative crown length was longer in trees growing on soil with a hard pan and broken trees, compared to trees growing on soil without a hard pan. These results were also in accordance with the distribution of aerial weight between the stem and crown, as crown weight without stem mass constituted a greater proportion of the aerial weight for these trees. Broken trees and inner trees growing on soil without a hard pan possessed a lower stem basal sweep. Initial lean of the trees was not significantly correlated to DBH. Conversely to the parallel axis, the winching direction asymmetry of the soil-root plate was always positive, i.e. all root plates were wider on the windward side of the tree. Moreover, the soil-root plate of edge trees was three times more asymmetric, with a soil-root plate 30% wider on the windward side of the tree and nearly two times larger compared to that of the inner trees. Consequently, edge trees had a higher soil-root plate mass/aerial mass ratio, as differences in aerial mass between inner and edge trees was not significant. As expected, rooting depth according to tree size was significantly higher in trees growing on soil without a hard pan. However there were no differences in soil-root plate volume. Trees possessing a tap-root accounted for only 25% of the uprooted trees, and 75% of the tap-rooted trees were growing on soil without a hard pan.

Soil moisture was significantly higher on wet Lande stands compared to dry Lande stands (respectively, $10.4 \pm 4.2\%$ and $6.0 \pm 1.9\%$, $P<0.001$), but also depended both on soil conditions and on the date of winching (“date” effect highly significant, $P<0.001$). Soil moisture content was generally low, ranging from 5 to 10%, apart from Eperville ($15.7 \pm 5.0\%$). No significant differences in soil mechanical behaviour between stands were observed. The internal friction angle was found to be $30\text{--}40^\circ$ and soil was classified as a well graduated and rounded sand.

Discussion

$TM_{crit, total}$ was correlated to tree size and particularly to stem weight or volume for Maritime pine. This result is in agreement with the previous studies on other species (Fraser 1962; Somerville 1979; Papesch et al. 1997; Gardiner et al. 2000; Meunier et al. 2002). As also found by Moore (2000) for *Pinus radiata*, the stem volume expression $(H \times DBH^2)$ was the best predictive variable for Maritime pine trees. Using $(H \times DBH^2)$ limits errors due to stem weight estimation and also allows the use of typical variables, which can be measured directly in the field. However, this variable did not completely explain the variability in $TM_{crit, total}$. Root system characteristics could partly explain this residual variability, but no relationships with rooting variables were found. Other root characteristics, e.g. I and T beam taper (Nicoll and Ray 1996), or the number and topology of roots on the windward side of the tree (Stokes et al. 1995, 1997) could explain this variability. In this study, soil shear strength

Table 3 Means \pm SD of tree dimensions according to the presence of a hard pan and inner/edge position. Variables showing a significant relationship to tree size were used as relative position. REGWQ multiple range test. Crossing the effects "presence of a hard pan \times inner/edge position" was never significant (*). Means with the same letter do not differ significantly at the 0.05 level as indicated by

Variable	With a hard pan		Without a hard pan		Broken trees	
	Inner trees $n=36$	Edge trees $n=19$	Inner trees $n=9$	Edge trees $n=3$	$n=27$	
Relative crown length (%)	41.45 \pm 13.19 a	44.85 \pm 17.24 a	31.54 \pm 4.01 b	29.78 \pm 6.22 b	41.64 \pm 10.98 a	
Basal sweep (°)	7.09 \pm 3.82 a	8.29 \pm 4.91 a	3.88 \pm 4.01 b	7.31 \pm 3.45 a	3.25 \pm 8.87 b	
Winching direction asymmetry of soil-root plate (%)	+8.10 \pm 7.65 a	+20.19 \pm 5.45 b	+4.82 \pm 13.37 a			
Parallel winching direction asymmetry of soil-root plate (%)	-0.63 \pm 6.59 a	-3.95 \pm 12.57 a	+0.96 \pm 5.22 a			
Stem weight*/aerial tree weight ratio	0.84 \pm 0.06 ab	0.79 \pm 0.09 b	0.87 \pm 0.03 a		0.84 \pm 0.02 ab	0.81 \pm 0.05 b
Rooting depth*/DBH ratio	2.47 \pm 0.58 a	2.21 \pm 0.77 a	3.18 \pm 0.63 b		2.56 \pm 0.50 b	
Soil-root plate volume*/stem volume ratio	2.41 \pm 0.97 a	3.62 \pm 1.08 b	2.46 \pm 0.56 a			

was similar in all the stands observed, and differences in soil moisture were not sufficient to influence anchorage strength. However, some variability in soil properties may also exist due to local variations in soil conditions. The pines studied were not clones but wild type from seed or natural regeneration, therefore any variability between trees may also be due to their genetic origin. As showed by Nicoll et al. (1995) in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) clones, tree morphology and root system architecture could depend on genetic factors. Furthermore, silvicultural treatments could induce this variability, e.g. superficial horizontal roots are damaged during weeding operations by disc ploughing when trees are young (Danjon et al. 1999).

Fraser (1962) found that $TM_{crit,total}$ of *P. sitchensis* and *Pseudotsuga taxifolia* increased if stands were drained. The author linked rooting depth to the mechanical resistance of anchorage. As discussed by Schaeztl et al. (1989), on sites where rooting depth was restricted, trees were highly susceptible to uprooting. The vertical root growth of Maritime pine is also affected by drainage and the presence of a hard pan horizon. Even if differences in rooting depth between the two soil conditions were significant, only quite shallow rooting depths were observed, i.e. 1.5 m maximum for a 50-year-old tree. Moreover, soil-root plate volume did not differ between the two soil conditions. The $TM_{crit,total}$ was not significantly modified according to the presence or absence of this hard pan for Maritime pine trees with the same H and DBH.

In a similar study, Stokes (1999) found that in winching tests carried out on juvenile Maritime pines, tree failure occurred through stem or stump breakage. In seeded young pines, the tap-root is a major component of the root system (Danjon et al. 1999), and is relatively longer with regards to shoot height and volume than in older trees. In mature pines, as rooting depth is often inhibited by the presence of a hard pan, the depth of the soil-root plate makes up only 4 \pm 1% of H . Therefore, it can be assumed that the role of the tap-root in anchorage strength differs according to tree age in these soil conditions, thus playing a major role in the anchorage of young pines (Stokes and Guitard 1997) and a more limited role in mature trees. Further support to this hypothesis is given, in our study, as most of the oldest uprooted trees exhibited no tap-root. The curves of tree mechanical behaviour also showed a critical loading point reached at the beginning of the winching test, when stem lean was small, particularly in the oldest trees. At this critical loading point, the turning moment resulting in tree weight represents a mean of 8.6 \pm 5% of the $TM_{crit,total}$ which is similar to results found by Papesch et al. (1997) for *P. radiata*. We can assume that this $TM_{crit,total}$ was explained partly by the strength of the superficial roots on the windward side of the tree. The superficial roots may take over the role the tap-root plays in anchorage and become eventually a major component in tree resistance to uprooting.

On soil with a hard pan, edge trees were 20% more resistant to winching compared to inner trees. These

results could be explained firstly by the fact that the soil-root plate of edge trees was two times larger and 30% wider on the windward side compared to that of the inner trees. Consequently, edge trees had a higher soil-root plate mass/aerial mass ratio, and root system weight plays a major role in resistance to uprooting (Coutts 1986). This higher surface area of the soil-root plate is probably due to the absence of neighbouring trees on this side of the tree. Secondly, the edge trees showed a higher winching direction asymmetry: a more offset gravity centre for the soil-root plate may increase resistance to uprooting. Lastly, as suggested by Mickovski and Ennos (2002) for Scots pine, it seems possible that the edge trees examined in this study may have responded to extra wind loading compared to inner trees, with changes in root growth, which would in turn improve anchorage strength. Stokes (1999) also showed that Maritime pine trees can respond to external mechanical stress, i.e. wind loading, by producing root-wood with different mechanical properties.

The results from this study will be highly useful in providing information on the root anchorage of Maritime pine, and how it can be affected by soil characteristics or position within a stand. In order to complete this study and confirm certain hypotheses, it would be necessary to obtain the missing dimensions for the soil-root plate characteristics. It could be extremely useful to uproot the root systems of broken trees, in order to compare root system characteristics between overturned and broken trees, as well as excavating the leeward side of uprooted trees and comparing windward and leeward root characteristics.

Acknowledgements This research was supported by GIP ECOFOR (contract no. 2002.09). The authors thank E. Borg, B. Issenhuth, H. Lataillade, H. Bignalet, N. Cheval (INRA, UE Hermitage, Bordeaux, France), M. Chassagne (UMR LRBB, Bordeaux, France), J.Y. Fraysse (Afoce Sud-Ouest, France) for their helpful assistance with fieldwork; T. Fourcaud (CIRAD, LRBB, Bordeaux, France) and F. Danjon (INRA, Unité EPHYSE Bordeaux, France) for their comments of this study.

References

- Coutts MP (1983) Root architecture and tree stability. *Plant Soil* 71:171–188
- Coutts MP (1986) Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* 59:173–197
- Danjon F, Bert D, Godin C, Trichet P (1999) Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. *Plant Soil* 217:49–63
- Fraser AI (1962) The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35:117–127
- Fredericksen TS, Hedden RL, Williams SA (1993) Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Can J For Res* 23:1760–1765
- Gardiner BA, Stacey GR, Belcher RE, Wood CJ (1997) Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70:233–252
- Gardiner BA, Peltola H, Kellomaki S (2000) Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecol Model* 129:1–23
- Jolivet C, Arrouays D, Andreux F, Leveque J (1997) Soil organic carbon dynamics in cleared temperate forest spodosols converted to maize cropping. *Plant Soil* 191:225–231
- Meunier S, Ruel JC, Laflamme G, Achim A (2002) Résistance comparée de l'épinette blanche et du sapin baumier au renversement. *Can J For Res* 32:642–652
- Mickovski SB, Ennos AR (2002) A morphological and mechanical study of the root systems of suppressed crown Scots pine *Pinus sylvestris*. *Trees* 16:274–280
- Moore JR (2000) Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *For Ecol Manage* 135:63–71
- Nicoll BC, Ray D (1996) Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiol* 16:891–898
- Nicoll BC, Easton EP, Milner AD, Walker C, Coutts MP (1995) Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. In: Coutts MP, Grace J (eds) *Wind and trees*. Cambridge University, Cambridge, pp 276–292
- Oliver HR, Mayhead GJ (1974) Wind measurements in a Pine forest during a destructive gale. *Forestry* 47:185–194
- Papesch AJG, Moore JR, Hawke AE (1997) Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *N Z J For Sci* 27:188–204
- Pardé J, Bouchon J (1988) *Dendrométrie*. ENGREF, Nancy
- Peltola H, Kellomaki S, Hassinen A, Granander M (2000) Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *For Ecol Manage* 135:143–153
- Ray D, Nicoll BC (1998) The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71:169–182
- Savill PS (1983) Silviculture in a windy climate. *For Abstr* 44:473–488
- Schaetzl RJ, Johnson DL, Burns SF, Small TW (1989) Tree uprooting: review of terminology, process, and environmental implications. *Can J For Res* 19:1–11
- Smith VG, Watts M, James DF (1987) Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Can J For Res* 17:1080–1091
- Somerville A (1979) Root anchorage and root morphology of *Pinus radiata* on a range of ripping treatments. *N Z J For Sci* 9:294–315
- Stokes A (1999) Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant Soil* 217:17–27
- Stokes A, Guitard D (1997) Tree root response to mechanical stress. In: Altman A, Waisel Y (eds) *Biology of root formation and development*. Plenum, New York, pp 227–236
- Stokes A, Fitter AH, Coutts MP (1995) Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. *J Exp Bot* 46:1139–1146
- Stokes A, Nicoll BC, Coutts MP, Fitter AH (1997) Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effects on biomass allocation, root development, and resistance to bending. *Can J For Res* 27:1049–1057
- Stokes A, Berthier S, Sacriste S, Martin F (1998) Variations in maturation strains and root shape in root systems of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Trees* 12:334–339
- Stone EL, Kalisz PJ (1991) On the maximum extent of tree roots. *For Ecol Manage* 46:59–102
- Terzaghi K, Peck R (1967) *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley, New York
- Trichet P, Jolivet C, Arrouays D, Loustau D (1997) Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime. In: ARBORA (eds) *De la forêt cultivée à l'industrie de demain*. ARBORA, Bordeaux, pp 25–44
- Young DF (1972) *Introduction to applied mechanics; an integrated treatment for students in engineering, life science, and interdisciplinary programs*. Iowa State University, Ames

III - 2 Le comportement d'endommagement du Pin maritime dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne

III - 2.1 Le principe de la méthode d'essais de flexion en statique

La méthodologie employée est classiquement utilisée dans les études de résistance mécanique des arbres (Fraser 1962, Somerville 1979, Coutts 1986, Smith *et al.* 1987, Fredericksen *et al.* 1993, Papesch *et al.* 1997, Ray et Nicoll 1998, Meunier *et al.* 2002, Moore 2000, Peltola *et al.* 2000). Pour suivre l'inclinaison de l'arbre au cours de l'essai, nous avons choisi d'utiliser des capteurs de déplacement (inclinomètres). Le système racinaire est un élément flexible : l'arbre n'est pas parfaitement encastré dans le sol. Sur la base d'essais de flexion réalisés sur de jeunes pins maritimes, Stokes (1999) suggère que les arbres tirés pivotent autour d'un point situé du côté sous le vent, possiblement au niveau du pivot. Pour vérifier ces hypothèses, en complément de l'inclinomètre placé au point de traction (niveau d'attache du câble) un inclinomètre a été rajouté au niveau de la souche, afin de suivre également le déplacement de la tige au plus près du sol.

L'angle de traction doit être faible afin de pouvoir assimiler cette traction à une force horizontale (composante verticale proche de zéro), comme recommandé par Neild et Wood (1999). Nous pouvons donc considérer la composante verticale de la force comme nulle. De plus, si l'élasticité de la tige est faible, le bras de levier peut être assimilé à la hauteur d'attache du câble sur l'arbre. En théorie, cette hauteur d'attache devrait être égale à au moins 80% de la hauteur totale de l'arbre pour conserver un stress uniforme le long de la tige lors de la traction (Wood 1995). Plus le point de traction est bas sur la tige, plus le stress est important à sa base. Cette hauteur d'attache théorique était peu envisageable dans le cadre d'essais de flexion visant uniquement à déraciner les arbres. Lors des essais, la hauteur du point de traction variait de 10 à 50% de la hauteur totale (30 à 50% de la hauteur totale de l'arbre chez Moore (2000) par exemple), ainsi le pin cassait lorsqu'il aurait été probablement difficile d'arracher l'arbre quelle que soit la hauteur d'attache du câble.

III - 2.2 La caractérisation pédologique des parcelles d'expérimentation

L'observation des plaques racinaires des pins déracinés lors des essais a mis en évidence la présence d'aliots même en lande sèche, parfois suffisamment induré pour stopper la croissance verticale des racines de la même façon qu'en lande humide. Lorsque la plaque racinaire présentait un "bouclier", c'est-à-dire une zone plate nette où apparaît un feutrage

dense de racines fines, le pin était noté comme ayant poussé sur de l'aliôs (Figure III - 1). Lorsque la plaque racinaire ne présentait pas cette configuration, mais plutôt la présence de pivots secondaires, voir d'un pivot principal visiblement ancrés plus profondément dans le sol que l'ensemble de la plaque, d'ailleurs moins bien définie, le pin était noté comme ayant poussé sans aliôs. Les plaques "mixtes", c'est-à-dire présentant les deux configurations, étaient notées "avec aliôs".

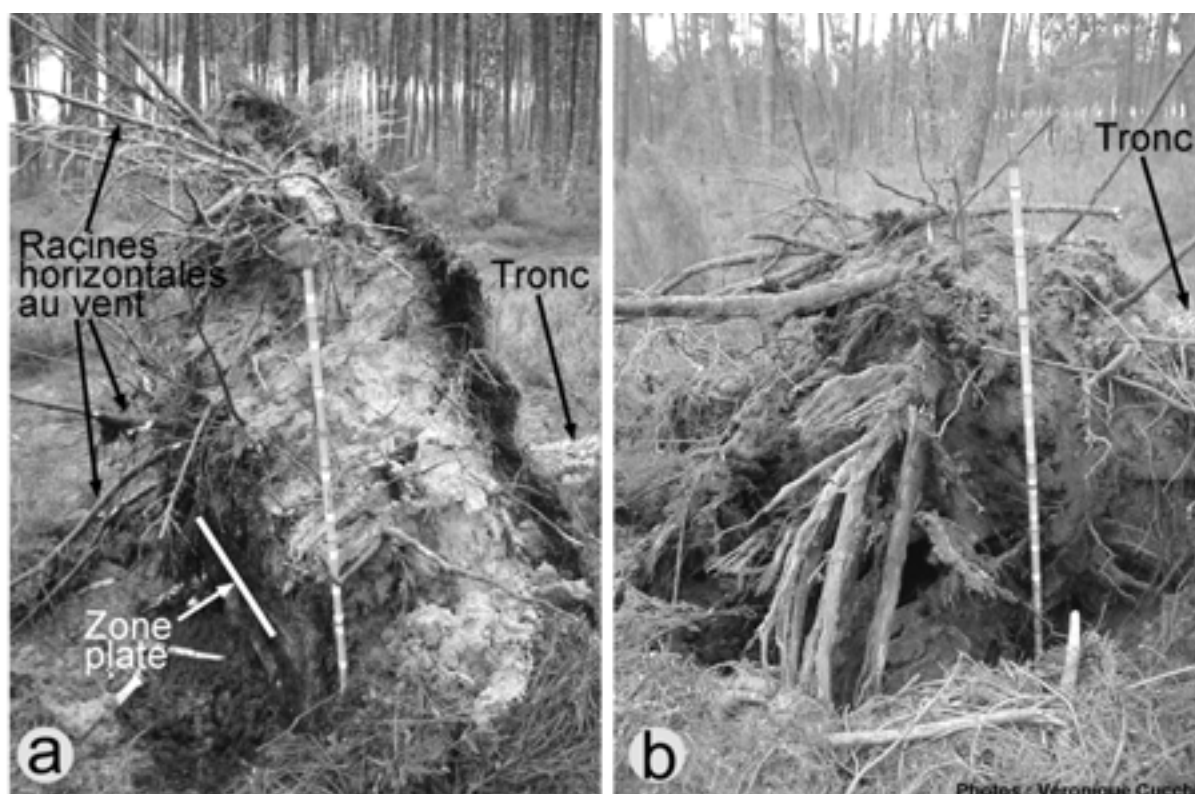


Figure III - 1 : Exemples des deux principaux types de plaque racinaire rencontrés, a) d'un pin poussant sur un horizon aliôsique induré, b) d'un pin poussant sur une zone sans aliôs.

Dans le cadre du projet CapForêt (<http://lrbb3.pierroton.inra.fr/capforet/capforet.htm>), A. Denis et R. Lastennet, du Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA), de l'Université Bordeaux 1, ont caractérisé la pédologie des parcelles prospectées (Cucchi *et al.* 2003). Leurs résultats indiquent également que la discrimination du type de lande, humide ou sèche, selon la caractérisation de la végétation adventice n'était pas suffisamment pertinente. En utilisant ce critère, les parcelles se situent en fait sur un gradient de sol entre la lande humide et la lande sèche (Tableau III - 1).

Tableau III - 1 : Caractéristique pédologique relative au type de lande déterminée par le CDGA pour chacune des parcelles prospectées.

Parcelle	Type de Lande	Département
Callen	sèche	40
Cameleyre	humide	40
Captieux	sèche	33
Coyole	mésophile à sèche	40
Domaine de France	mésophile à humide	33
Eperville	<i>non prospectée</i>	33
Luë	mésophile à humide	40

Sur Eperville, un bouclier racinaire lié à la présence d'une couche d'aliros induré a été constaté sur tous les individus déracinés. Cette observation, ainsi que la bonne fertilité stationnelle, indiquent que la parcelle se situe probablement en lande humide.

Tableau III - 2 : Importance du recouvrement de l'horizon d'aliros induré sur chaque parcelle par la méthode du Radar sol et comparaison avec les résultats issus des observations sur les pins testés en flexion et déracinés.

Parcelle	% de niveau d'aliros continu au radar sol	% de pins "sur aliros"*	Commentaires
Callen	20	25	Réflecteur de faible amplitude entre 40 et 50 cm en profondeur
Cameleyre	.	100	Nappe superficielle : pas de radar
Captieux	0	0	Aucun réflecteur détecté entre 0.40 et 1 m de profondeur.
Coyolle	40	58	Réflecteur entre 50 et 70 cm en profondeur
Domaine de France	90	94	Le niveau d'aliros se situe entre 45 et 70 cm en profondeur
Eperville	.	100	<i>Non prospectée</i>
Luë	70	92	Réflecteur entre 50 et 70 cm en profondeur

*données issues des essais de flexion, pins reclassés suite à l'observation de la plaque racinaire ou aux sondages tarière ; 10 individus, cassés, n'ont pas pu être classés (5 pour Callen, 2 pour Domaine de France, 1 pour Coyolle).

Une estimation de la superficie de la parcelle occupée par la couche d'aliôs en % a pu être réalisée à l'aide de la technique du radar sol (Dupuy 1987). Cette technique est basée sur l'émission et la réception en retour d'ondes électromagnétiques. Le tableau III - 2 présente les résultats obtenus par le CDGA sur l'ensemble des parcelles, sauf Eperville, qui n'a pas été testée, et Cameleyre, où la présence d'une nappe superficielle ne permettait pas d'utiliser le radar.

Les résultats issus du radar sol sont plus faibles de 4 à 22% par rapport au taux d'arbres classés "sur aliôs" sur la base de l'observation de leur système racinaire pour chacune des parcelles.

Outre le pourcentage de recouvrement de l'aliôs, les caractéristiques pédologiques en lande sèche et humide sont identiques concernant le taux d'humidité, la perméabilité et le cisaillement du sol, qui n'ont donc pas d'influence sur les valeurs de force obtenues lors des essais de flexion. L'humidité des horizons A1-A2 des parcelles a été mesurée par des méthodes directes par le CDGA (Cucchi *et al.* 2003), et par la méthode indirecte de différentiel de poids présentée dans l'article. Les deux méthodes montrent une teneur en eau du sol faible, loin de l'état de saturation sur toutes les parcelles sauf sur Cameleyre où la nappe était présente entre 0.6 et 0.9 m (CDGA). Les analyses de perméabilité réalisées par le CDGA indiquent une valeur comprise entre 6 et $8.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$.

D'après Dupuy (2003), lors d'un déracinement en sol argileux, le complexe sol-racines s'enfonce et glisse dans le sol en même temps qu'il opère une rotation, le mouvement du système racinaire fluidifiant le sol en contact. En revanche, dans un sol sableux comme dans cette étude, le mécanisme de déracinement d'un arbre peut s'apparenter à un basculement, avec un soulèvement du centre du système racinaire : le substrat se compacte sous la pression et offre un appui au basculement. Les propriétés mécaniques du sable impliqueraient un soulèvement important de la partie du système au vent par rapport à l'enfoncement dans le sol de la partie sous le vent. De plus, l'effet de basculement dû à la compaction du sable est peut-être accentué par la présence de l'horizon aliôsique induré.

III - 2.3 Le comportement mécanique du Pin maritime à l'arrachage

Lors des essais de flexion, le processus de déracinement des pins âgés apparaît effectivement comme un basculement autour d'un plan charnière situé en avant de l'arbre, avec un fort soulèvement du système racinaire côté au vent. Les données obtenues lors des essais nous permettent de caractériser plus en détails le processus de déracinement du Pin maritime pour ces conditions pédologiques.

Des tests en statique permettent de mettre au point les régressions prédisant le moment total de renversement nécessaire au déracinement d'un pin selon les facteurs de sol et d'exposition. Une longue phase de dépouillement des données et de calculs est nécessaire. En premier lieu, les données de force et d'inclinaison enregistrées automatiquement au cours de l'essai ont fait l'objet de vérifications effectuées manuellement. Par exemple, l'enregistrement des *data logger* pouvait présenter des anomalies : défaut d'enregistrement pour un pas de temps, défaut d'alimentation par batterie. Les données d'origine du capteur de force sont en mV ; une fois vérifiées, elles ont été transformées en utilisant les courbes d'étalonnage du capteurs, afin d'obtenir des Newtons. De la même façon, les données originelles d'inclinaison, également en mV, ont été transformées pour obtenir un angle en degrés, mais elles ont fait l'objet d'une transformation supplémentaire. En effet, les capteurs de déplacement employés fonctionnent selon deux entrées orthogonales, qui permettent d'enregistrer le déplacement en trois dimensions. Des calculs trigonométriques ont donc été nécessaires pour obtenir pour chaque inclinomètre un angle en degrés indiquant le déplacement de l'arbre. Ensuite, le moment de renversement des arbres a été calculé en intégrant à la fois le moment appliqué à l'arbre et le moment généré par la biomasse aérienne. Pour cela, il a été nécessaire de contrôler le comportement de chaque pin (courbes de force et d'inclinaison en fonction du temps) afin d'identifier pin par pin le point critique (force maximale appliquée) correspondant au moment où l'ancrage avait cédé. Les calculs de moment total de renversement issus de la première campagne ont été traités arbre par arbre, puis un programme de calcul sous SAS a été mis au point pour traiter les données de la seconde campagne de terrain. Ce programme calcule automatiquement le moment total de renversement de chaque arbre en utilisant les caractéristiques dendrométriques de l'arbre (hauteur totale et de première branche verte, diamètre, défilement de tige, biomasse aérienne), la force maximale appliquée et le déplacement associé des deux inclinomètres. Ce programme permet également d'obtenir le moment total, appliqué et dû au poids, au fur et à mesure du déroulement de l'essai, en fonction du déplacement de la tige en degré. Ces courbes illustrent le comportement mécanique de l'ancrage de l'arbre. La figure III - 2 présente quelques exemples de courbes obtenues selon l'âge du pin, la présence d'aliés et l'exposition aux vents dominants. Ces courbes représentent l'ensemble des différents comportements observés.

Il apparaît que :

- i) La pente initiale de la majorité des courbes étant forte, la rigidité de la tige est importante pour la majorité des arbres. Seuls huit individus parmi 70 montrent une rigidité de tige plus faible. Par exemple, les courbes rouge et bleue représentés sur le graphique a) indiquent une plus faible rigidité de tige que la courbe noire. Une faible

flexion de la tige des pins âgés a effectivement été constatée lors des essais de flexion. La rigidité de la tige sur les arbres de lande sèche, notamment sur la parcelle Callen, est plus importante comparativement à la lande humide (rupture de l'ancrage à $3^\circ \pm 1.8$ d'inclinaison contre $11^\circ \pm 7$ pour la lande humide).

- ii) Le déplacement de la tige nécessaire pour atteindre le point critique de résistance de l'ancrage est relativement faible. La moyenne du déplacement est de $9^\circ \pm 7$, soit une inclinaison du bras de levier de 15° , résultat comparable à ceux de Oliver et Mayhead (1974) et Peltola *et al.* (2000) pour du Pin sylvestre installé sur sol sableux. La rupture de l'ancrage intervient dans 28% des cas à une inclinaison de moins de 10° et dans 22% des cas à une inclinaison de plus de 20° . L'inclinaison initiale du bras de levier n'est pas corrélée avec le moment de renversement ou le déplacement appliqué lorsque la force est maximale. Le poids contribue faiblement au moment total critique de renversement (comparaison entre le niveau de la courbe pointillée noire et celui de la courbe continue noire au niveau de la flèche rouge pour le graphique (a)). Du fait de la forte variabilité individuelle - la contribution du poids varie de 4 à 32% - aucun effet de la présence de l'aliou ou de l'exposition sur la contribution du poids n'a pu être mis en évidence.
- iii) Ces courbes présentent une forme différente selon l'âge de l'arbre. Contrairement aux pins matures, les jeunes individus, ici des pins de 15 ans, ne se "renversent" pas réellement, comme l'a également observé Stokes (1999) sur cette essence. Sur ces pins, la traction a été prolongée afin de les coucher au sol. En effet, bien que la force maximale à appliquer pour faire céder l'ancrage aie été atteinte, l'arbre restait incliné sans toucher terre. Le poids faible de l'arbre ainsi que la partie non endommagée du système racinaire pouvaient être suffisants à le maintenir "en l'air". Ainsi les courbes ne montrent pas de décroissance marquée après le point maximal, tel que sur les trois courbes continues du graphique (f). La détermination du point correspondant à la rupture globale de l'ancrage a été difficile dans ce cas, non seulement à cause d'une traction prolongée, mais aussi parce que sur ces parcelles, la densité de peuplement a entraîné de fortes interférences avec les houppiers voisins au cours de l'essai de flexion. Ces interférences donnent des courbes chaotiques (voir les trois courbes continues sur le graphe (b)).
- iv) Pour des arbres plus âgés, la forme de la courbe "moment total" et de la courbe "moment dû au poids" sont similaires à celles obtenues par Papesch *et al.* (1997) pour *Pinus radiata*. Le point correspondant à la force appliquée maximale apparaît nettement : le renversement est réel (flèche rouge). Certaines courbes "moment total" chez des pins de 50 ans poussant en absence d'aliou présentent une

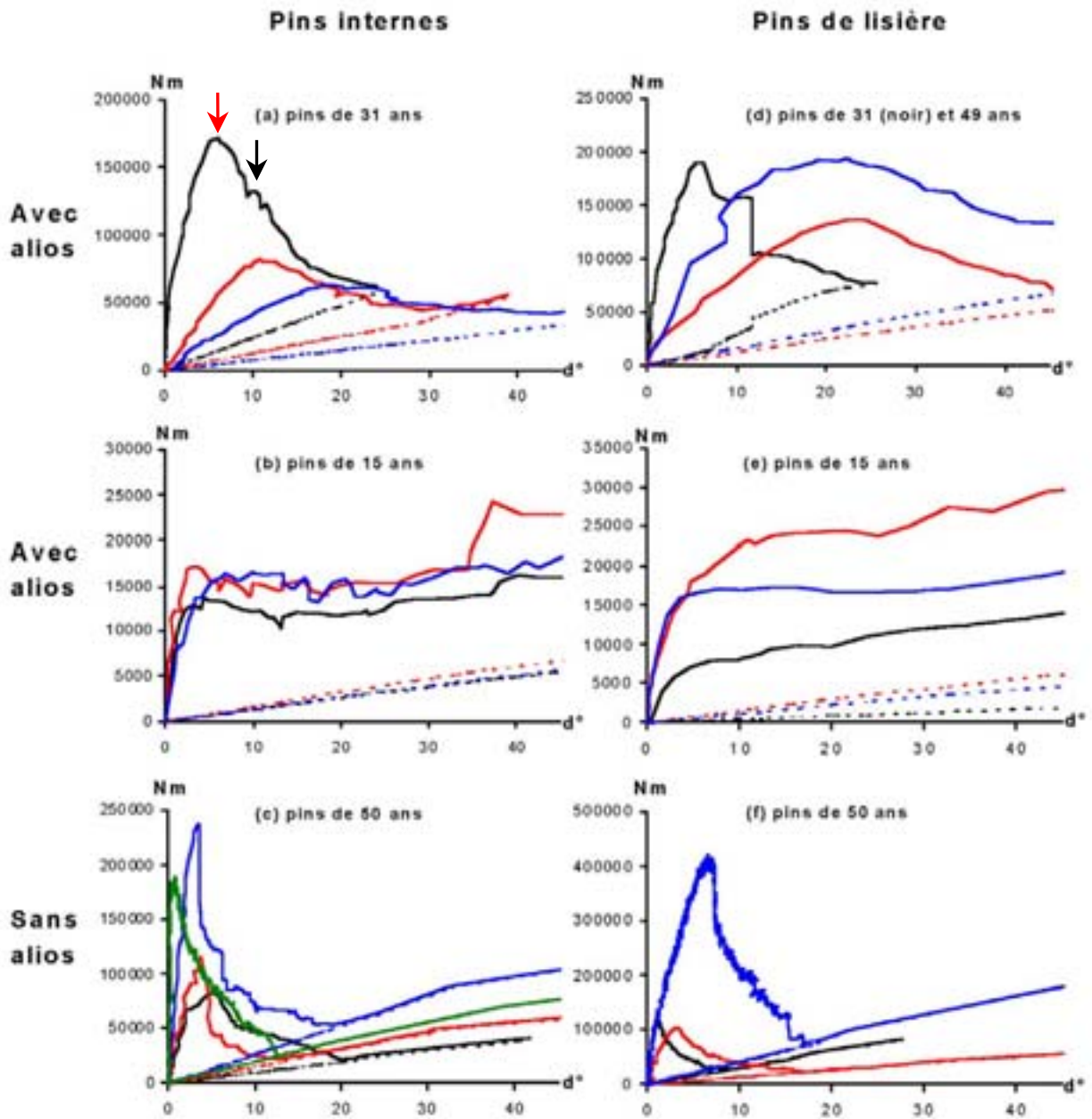


Figure III - 2 : Courbes de comportement des pins à l'arrachage ; en abscisse, le déplacement de la tige en degrés, en ordonnée, le moment en Nm. Pour chacun des graphiques, chaque couleur représente un pin. Le moment total correspond à la courbe supérieure (ligne continue), et le moment dû au poids de la partie aérienne à la courbe inférieure (ligne pointillée). Les couleurs entre les graphes n'ont pas de lien. La flèche noire du graphique (a) montre une remontée du moment total après le passage du point critique (flèche rouge).

forme irrégulière, par exemple la courbe continue verte du graphique (c), ou la courbe bleue du graphe (f). Ceci est dû à l'emploi du tire-fort manuel à la place du tire-fort motorisé. Ce dernier permet une traction plus constante dans le temps, mais le tire-fort manuel a du être employé lorsque l'arbre montrait une résistance supérieure à la capacité de traction de l'appareil motorisé.

Une remontée du moment total de renversement après le point critique est observée sur certaines courbes (par exemple, flèche noire). Ce phénomène pourrait être expliqué par une mise en tension de racines courbes non sollicitées en début de traction (comm. pers. T. Fourcaud).

La figure III - 3 est un exemple de forme de courbe obtenue lorsque la rotation à la souche est représentée en fonction de la rotation au niveau d'attache du câble de traction. Ce type de courbe exprime à la fois la rigidité de la tige et celle de l'ancrage. L'exemple présenté montre qu'une rotation a lieu au niveau de la souche : comme attendu, l'encastrement n'est pas parfait. La tige plie d'abord légèrement sans que le système racinaire ne suive, puis celui-ci entame son basculement. Bien qu'elles aient été tracées pour chaque pin, les courbes ne sont pas comparables entre elles à cause de la variation de niveau d'attache du câble. Ce type de comparaison aurait nécessité un point de traction situé à un niveau relatif identique pour tous les arbres.

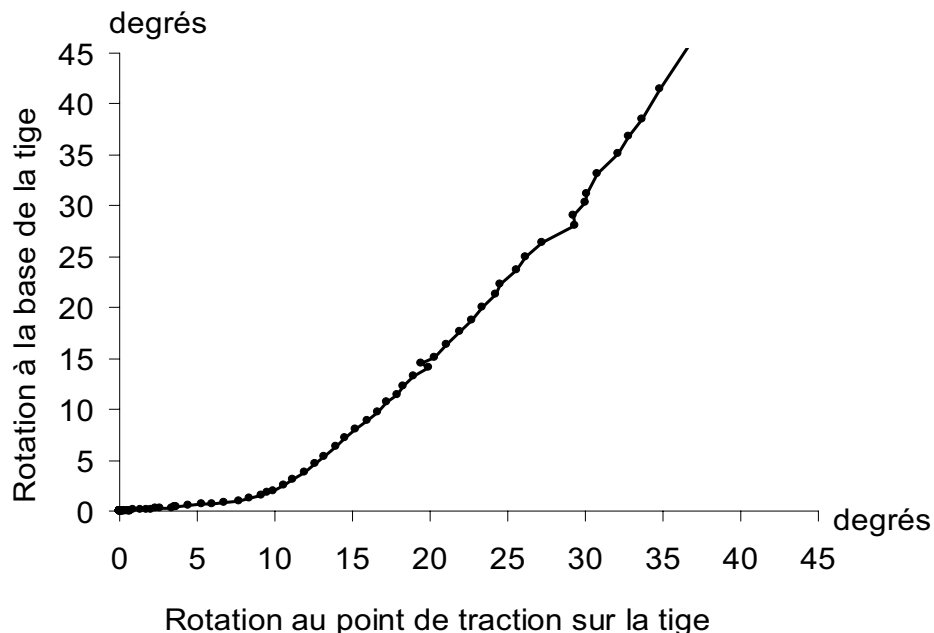


Figure III - 3 : Exemple de courbe de rotation à la souche versus rotation au point de traction en degrés, obtenue pour un Pin maritime de 30 ans interne, poussant sur alios, Hauteur = 19.2 m, DBH = 37.7 cm, hauteur de traction par rapport à la hauteur totale du pin = 49%. Chaque point correspond à un enregistrement.

III - 2.4 L'observation de la morphologie des plaques racinaires

L'extension plus importante de la plaque racinaire au vent des pins de lisière augmente leur résistance à l'arrachage par rapport aux pins internes. Cette extension est due à l'absence de compétition intraspécifique de ce côté de l'arbre, la surface de plaque racinaire étant corrélée à la densité de population (Caldwell 1987, Cucchi et Bert 2003). De plus, pour les arbres de lisière poussant sur alios, une corrélation positive significative au seuil de 5% ($p = 0.0442$) existe entre le moment critique de renversement et le rayon inférieur de la plaque (R5 de l'article n°1, Cucchi et Bert 2003) standardisés par la taille de l'arbre. Or la distance entre la tige et le point de pivotement de la plaque, situé du côté de la traction, influence la résistance de l'arbre : plus cette distance est importante, plus l'inclinaison requise pour dépasser le point d'équilibre de l'arbre au-delà duquel son propre poids participe à sa chute est importante. Un plus fort diamètre des racines sous le vent participe à l'éloignement de ce point de rotation par rapport à la souche, en résistant mieux à la compression. La croissance de ces racines sur des conifères sollicités régulièrement par le vent est importante dans l'axe de la flexion (formes en **I** ou en **T**) (Nicoll et Ray 1996, Stokes *et al.* 1998). Ce développement particulier augmente la résistance de ces racines à la flexion.

Outre les mesures des dimensions de chaque plaque racinaire, le diamètre de chaque racine horizontale émergeant du bord de la plaque (Figure III - 1) a également été mesuré en bordure de plaque, afin de tenter de relier ces diamètres à la résistance de l'arbre à l'arrachage. La surface de section de chaque racine (Cross Sectional Area ou CSA) a été calculée. On a cherché, à partir de ces données de racines, à distinguer des "types morphologiques" par arbre. S'ils existent, peuvent-ils être mis en relation avec la résistance de l'arbre?

Une analyse en composante principale a été utilisée pour essayer de distinguer ces "types morphologiques". La contribution de la CSA de chaque racine horizontale (CSA_{root}) par rapport à la surface de section totale pour le pin considéré ($\sum CSA_{tree}$) a été calculée et exprimée en pourcentage.

$$\%contribution_{root} = \frac{CSA_{root}}{\sum CSA_{tree}}$$

Ainsi, une petite valeur indique que la racine représente une faible surface comparée à la surface racinaire totale. Il s'agit alors soit d'un effet de taille (racine à faible diamètre par rapport à des racines plus grosses), soit d'un effet de nombre (nombreuses racines qui contribuent chacune peu au total). Si une racine présente une très forte contribution, il ne peut s'agir que d'une racine à diamètre relatif important.

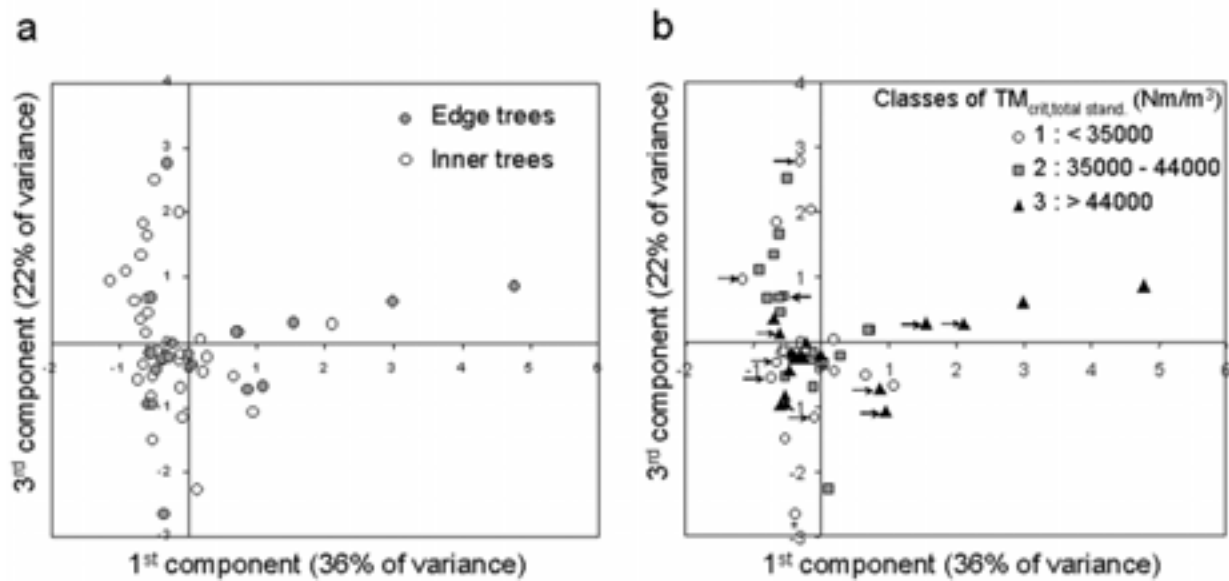


Figure III - 4 : Analyse en composante principale effectuée sur la ΣCSA obtenue pour les racines horizontales au vent, projections sur la première et la troisième composante : a) les pins sont distingués selon leur exposition au vent (pins internes = inner trees, pins de lisière = edge trees), b) les pins sont distingués selon leur classe de moment critique de renversement standardisé par la taille de l'arbre ($H \times DBH^2$), les trois classes ont été définies selon une distribution par centiles. Les flèches indiquent la présence d'un pivot observé comme plus profondément ancré que la profondeur moyenne de la plaque.

La contribution des racines horizontales a été séparée en 5 classes, de la classe 1 comptant les racines de plus faible contribution (< 4%), à la classe 5 pour celles ayant la contribution la plus élevée (> 70%). Chaque racine est donc associée à une classe. Pour chaque classe, les contributions des racines sont sommées, donnant une valeur par classe pour chaque pin. Un pin avec une valeur importante dans une classe de contribution faible présente de nombreuses racines, à faible CSA, et un pin avec une valeur importante dans une classe de contribution forte présente peu de racines, à fort diamètre. L'absence de contributions aberrantes (par exemple, une seule racine) a été vérifiée. L'ACP est effectuée sur ces valeurs (Figure III - 4). Les trois premières composantes expliquent 82% de la variabilité. La première composante (PC1) est représentée de façon égale à 68% par les classes 1 et 2, la seconde à 63% par la classe 3 et la troisième à 77% par la classe 4 et à -56% par la classe 3. Seules les composantes PC1 et PC3 montraient visuellement une tendance, PC2 n'est donc pas représentée graphiquement.

L'analyse ne fait pas apparaître de groupes de pins de façon nette suivant la distribution de taille des racines horizontales situées au vent. Cependant, quelques tendances peuvent être remarquées : les individus se détachant à droite sur la PC1 possèdent de nombreuses

racines, de contribution faible et homogène (Figure III - 4a). *A contrario*, les pins se situant le long de l'axe 3 présente une forte hétérogénéité de contribution, augmentant dans la partie positive de l'axe. Ils correspondent essentiellement à des pins internes, tandis que ceux distribués le long de l'axe 1 sont surtout des pins de lisière. Sur la figure III - 4b, les pins de lisière, situés à droite sur l'axe 1, sont les plus résistants, tandis que ceux internes situés le long de l'axe 3 présentent une résistance moyenne à faible. La présence d'un pivot apparent (grosse racine de structure située sous la tige et émergeant nettement de la plaque racinaire car s'enracinant plus profondément dans le sol) observé sur la plaque ne semble pas corrélée à la résistance de l'arbre.

L'homogénéité de taille et le nombre des racines horizontales au vent, bien que basés sur des diamètres mesurés en sortie de plaque et donc à des niveaux variés par rapport à la souche, peuvent favoriser la résistance des pins de lisière. Ainsi, Stokes *et al.* (1995 et 1997) ont montré que de jeunes Epicéas de Sitka soumis à une charge mécanique, générée en soufflerie ou par machine à secouer, produisent des racines plus nombreuses et plus ramifiées du côté d'où vient le stress, augmentant la résistance au déracinement en distribuant mieux les contraintes dans le sol. De plus, plus les racines sont nombreuses et ramifiées, plus la résistance mécanique globale en tension est importante (Dupuy 2003). La symétrie topologique du système racinaire améliore alors sa résistance. En effet, une dissymétrie concentre les forces en tension sur certaines racines plutôt que sur l'ensemble du système.

Des différences apparaissent entre la direction de chute et la direction de traction des pins testés : certains pins pivotent lors du déracinement. La variabilité individuelle est forte avec un maximum de 43° et un minimum de 0° (chute du pin exactement dans l'axe de la traction). Ce résultat est cohérent avec la large gamme d'amplitude des azimuts de chute constatée sur les arbres déracinés par la tempête. Du fait de cette variabilité, aucune différence significative selon l'exposition ou la présence d'aliés n'a pas été mise en évidence, et aucune corrélation n'est visible avec le moment critique de renversement. 15.7% des pins présentent un pivotement supérieur ou égal à 20° au cours du déracinement. Ce pivotement observé lors de la chute des arbres testés peut s'expliquer par l'asymétrie racinaire évoquée précédemment. La rupture des racines horizontales, côté au vent, se fait en séquence. Il aurait été utile de mesurer les azimuts et la topologie (position les unes par rapport aux autres) de ces racines, afin de pouvoir caractériser cette asymétrie, et voir si une corrélation existe avec la résistance de l'arbre à l'arrachage.

III - 2.5 Conclusion de cette étude d'ancrage

En lande humide, les arbres de lisières sont plus résistants que les arbres internes. En revanche, la meilleure résistance des arbres de lisière par rapport aux arbres internes n'apparaît pas en lande sèche. Ceci est sans doute dû à une plus forte variabilité des moments critique de renversement et à la trop faible taille de l'échantillon d'arbres de lisière (seulement trois pins). Cette taille d'échantillon est liée au reclassement des pins *a posteriori* en fonction de la présence ou de l'absence d'aliôs selon l'observation de leur système racinaire.

Des racines au vent, susceptibles de faire l'objet de propriétés mécaniques différentes (adaptation), ont été prélevées sur les deux catégories de pins déracinés, afin de comparer leur résistance en flexion et en compression. Les résultats des essais de traction actuellement réalisés nous permettront d'estimer l'intérêt de ce type d'expérimentation.

Les pins poussant sur l'aliôs ne sont pas moins résistants au déracinement que les pins poussant en absence d'aliôs. Ce résultat est inattendu, étant donné la profondeur d'ancrage significativement plus importante pour la seconde catégorie de pins. Néanmoins, l'absence de différence de résistance à l'arrachage entre lande sèche et lande humide ne signifie pas un ancrage équivalent sur les deux types de station. La réponse de l'arbre à la traction statique pourrait être une réponse en "tout ou rien" : un déracinement sans discrimination de résistance quelque soit la station, jusqu'à un seuil de résistance de l'ancrage où l'arbre casserait. Ce seuil de résistance pourrait être atteint grâce à la présence d'un pivot beaucoup plus marqué que ceux observés sur les arbres déracinés, ou par le développement de pivots secondaires. Effectivement, d'après Dupuy (2003), le bénéfice du pivot dans la résistance à la traction n'est effectif que pour des pivots très profonds.

Deux hypothèses peuvent expliquer le plus fort taux de casse sur la parcelle Captieux. Tout d'abord, les pins étant encore jeunes et leur système racinaire se développant sans obstruction sur cette parcelle, les racines profondes et le(s) pivot(s) peuvent améliorer l'ancrage de façon importante. Ceci est d'autant plus vrai en sol sableux. Ensuite, cette casse peut être expliquée par une résistance de tige plus faible à cause d'un coefficient de forme plus élevé que sur les autres peuplements ($H/DBH = 83 \pm 10$). En revanche, sur Callen ou Coyole, les arbres cassés ne sont pas significativement plus élancés que les arbres déracinés ($H/DBH = 65 \pm 10$ pour les cassés, 66 ± 11 pour les déracinés, $p > 0.05$).

Néanmoins, il convient de rester prudent sur la comparaison de type de dommage entre peuplements, le protocole n'ayant pas été élaboré pour cette comparaison. En effet, la variation de hauteur d'attache du câble induit un biais important.



Photo : B. Nicoll, Forestry Commission, GB.

Photo III - 1 : Système racinaire d'un pin d'âge indéterminé poussant en milieu dunaire, mis à nu par un effondrement. Le pivot central est particulièrement visible.

La résistance de l'ancrage chez les pins âgés testés en flexion reposerait principalement sur la partie superficielle (racines horizontales et obliques) du système racinaire, lorsqu'un développement optimal du pivot principal fait défaut, ce qui est le cas le plus souvent (Stokes *et al.* 2004). Ceci se rapprocherait de ce qu'à observé Coutts (1983) sur l'Epicéa de Sitka : la première composante de l'ancrage est constituée par les racines sollicitées en traction (60% de la résistance de l'arbre). De plus, d'après Ennos (1993), l'efficacité des systèmes racinaires pivotants diminue avec l'âge. Contrairement à Fraser (1962) sur *Picea sitchensis* et *Pseudotsuga taxifolia*, la présence des pivots observés ne semble pas corrélée avec la résistance à l'arrachage chez les individus âgés. Néanmoins, ces pivots sont peu comparables à ceux que l'on peut observer sur des Pins maritime poussant en zone dunaire, tel que le montre la photo III - 1. Cependant, dans une étude comparant l'architecture de systèmes racinaires de pins de 50 ans en peuplement déracinés par la tempête de 1999 et de pins restés intacts, les résultats indiquent que la principale différence entre les deux catégories d'arbres réside dans la présence de pivots secondaires chez les pins intacts, qui serait un facteur de meilleure résistance (comm. pers. F. Danjon). Ces résultats rejoindraient

ceux obtenus sur l'éloignement du point de rotation de la plaque sous le vent. Le développement du pivot étant fortement contraint dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne, le Pin maritime pourrait acquérir un meilleur ancrage par un développement accru des racines superficielles au vent et un renforcement des racines verticales et obliques sous le vent. En revanche, dans le cas où un réel système pivotant peut se développer, en dune par exemple, l'ancrage serait beaucoup plus efficace, ce qui induirait plutôt une rupture dans la tige.

Ainsi, tester l'ancrage de pins âgés poussant en zone dunaire aurait été intéressant, de même qu'il aurait été judicieux d'extraire le système racinaire des pins cassés afin de vérifier la présence de structures différentes de celles des pins déracinés.

Cette étude met en évidence la forte variabilité individuelle des comportements à l'arrachage et de la résistance des arbres, sans doute dues en partie à la morphologie du système racinaire. Nous n'avons pas pu mettre en évidence des caractéristiques qui permettraient d'expliquer la variabilité du moment critique de renversement observée. L'existence de modèles d'ancrage théoriques peuvent suggérer les variables essentielles à mesurer pour la compréhension de cette qualité d'ancrage. Notamment, il semble que 70% de la variabilité de la résistance du système racinaire à la traction provienne de l'importance des ramifications, du volume et du diamètre de base des racines (Dupuy 2003). Enfin, cette étude représente une source d'informations nécessaires pour l'adaptation d'un modèle de prédiction du risque, présentée au chapitre suivant.

Sommaire

- Chapitre IV -

Modélisation des vitesses critiques de vent

IV - 1	Modélisation des vitesses critiques de vent pour des peuplements simulés de Pin maritime à l'aide de la connexion Capsis-PP3/ForestGALES - Article soumis à <i>Forest Ecology and Management</i>	60
IV - 2	Fonctionnement de GALES et ajustement des relations pour le Pin maritime cultivé dans les Landes de Gascogne	77
IV - 2.1	Fonctionnement du modèle "GALES"	77
IV - 2.1.1	Phase 1 : prédiction des vitesses critiques	78
IV - 2.1.2	Phase 2 : prédiction des périodes de retour	81
IV - 2.2	L'utilisation du Module de Rupture sur pied des arbres testés en flexion pour l'estimation du facteur nœud	82
IV - 2.3	Comparaison entre l'estimation du poids de tige par GALES et par PP3	83
IV - 2.4	Conclusion sur l'ajustement de GALES au Pin maritime et la réaction du modèle aux éclaircies	85

IV - 1 Modélisation des vitesses critiques de vent pour des peuplements simulés de Pin maritime à l'aide de la connexion Capsis-PP3/ForestGALES - Article soumis à *Forest Ecology and Management*

Résumé de l'article Le but de cette étude était de construire un outil d'aide à la gestion capable de prédire la résistance au vent de peuplements équiennes monospécifiques de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) poussant dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne (France).

Premièrement, on a choisit GALES, modèle de prédiction du risque, implémenté dans le logiciel d'aide à la décision ForestGALES. Il permet de prédire la vitesse critique (CWS) requise pour casser ou déraciner l'arbre de surface terrière moyenne d'un peuplement forestier à partir de données de type tables de production. Les relations espèce-dépendantes présentes dans ce modèle ont été adaptées grâce aux données issues d'essais de flexion.

Deuxièmement, le modèle de croissance du Pin maritime, PP3, implémenté dans le logiciel CAPSIS, a été connecté à ForestGALES dans le but d'effectuer des simulations avec autant de scénarios sylvicoles voulus. Ainsi, GALES utilise les caractéristiques dendrométriques de l'arbre moyen générées par PP3 comme entrées, et calcule les CWS à chaque étape des scénarios.

Différents scénarios sylvicoles pour le Pin maritime ont été simulés en fonction de différentes densités initiales, intensités d'éclaircie et indice de fertilité du site.

La vitesse critique de déracinement est généralement inférieure à celle nécessaire pour la casse : le déracinement est le dégât le plus fréquent. Les simulations montrent une augmentation de la sensibilité au vent du peuplement avec l'âge, quelque soit le scénario. La vitesse critique requise pour ruiner le peuplement est minimale vers 40 - 45 ans, lorsque l'intérêt commercial du peuplement commence à être important.

Deux scénarios sylvicoles ayant le même indice de fertilité ont été simulés en contrastant la densité initiale et l'intensité des éclaircies. Bien que les arbres du peuplement le plus dense soient plus élancés, ce peuplement est plus résistant au vent que le moins dense, et ce jusqu'à 45 ans. Ceci peut être expliqué par une diminution de la pénétration du vent au sein du peuplement.

En se basant sur le scénario de plus faible densité, deux simulations de peuplements employant des indices de fertilité différents ont également été réalisées. Un plus fort indice

de fertilité entraîne une plus grande sensibilité au vent du peuplement, due à l'augmentation de la hauteur dominante.

En changeant le paramètre empirique déterminant la résistance de l'ancrage dans GALES, deux conditions de sol différentes ont été simulées. Les conditions de sol influencent les vitesses critiques de vent et le type de dégât.

Le Pin maritime a été comparé au Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en utilisant les relations espèce-dépendantes propres au Pin sylvestre présentes dans GALES, mais les caractéristiques dendrométriques générés par PP3 comme entrées. Les différences en vitesses critiques de vent étaient faibles entre les deux essences.

Soumis à *Forest Ecology and Management*

Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)

¹Véronique Cucchi, ^{1*}Céline Meredieu, ²Alexia Stokes, ³François de Coligny, ⁴Juan Suarez, ⁴Barry A. Gardiner

¹Unité EPHYSE, Institut National de la Recherche Agronomique, (Functional Ecology and Environmental Physics Unit, INRA) 69 route d'Arcachon, 33 612 Cestas Cedex, France

²Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, (Mixed Unit CNRS, INRA, Université Bordeaux I), 69 route d'Arcachon, 33 612 Cestas Cedex, France

³UMR AMAP-INRA, Bd de la Lironde TA 40 / PS2 34398 Montpellier Cedex 5, France

⁴The Forestry Commission Research Agency, Northern Research Station, Roslin, Midlothian EH25 9SY, Scotland

* Corresponding author

e-mail: Celine.Meredieu@pierroton.inra.fr

Tel: +33-5-57122861, Fax: +33-5-56680546

Abstract The aim was to build a management tool able to simulate stand windfirm for even-aged stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in the silvicultural conditions of the Landes de Gascogne region, SW France. First, data from previous winching tests were used to adapt the wind risk assessment model GALES by adjusting the species-dependant relationships in this model. GALES, implemented into the decision support system ForestGALES, predicts the critical wind speed (CWS) required for breaking or overturning the mean tree of a forest stand. Second, a tree growth model for Maritime pine, PP3, implemented in the software CAPSIS, was connected to ForestGALES, in order to simulate many different silvicultural scenarios. Different silvicultural scenarios for Maritime pine were simulated according to different initial spacing, intensity of thinning and fertility index. GALES used tree size

characteristics generated by PP3 as input, and calculated CWS at each step of the scenarios. The overturning CWS was usually lower than that for stem breakage, therefore overturning occurs more frequently. Simulations showed an increase in sensitivity to wind with age, whatever the silvicultural scenario. The minimal CWS required to damage the stand occurred at 40 - 45 years, which corresponds to the age where timber volume is of high commercial interest. Two silvicultural scenarios with the same site index were simulated by contrasting the initial density and the intensity of thinning. Trees in the higher density stand were less tapered and surprisingly this stand was more resistant to wind before 45 years. This phenomenon may be explained by a decreased wind penetration into the stand. Using the low density silvicultural scenario, the effect of two different fertility indices were also tested. The highest site

index resulted in a greater sensitivity to wind as tree top height was increased. By changing the empirical parameter determining anchorage resistance in GALES, the effect of two different soil conditions was simulated. Large differences in CWS were found and soil conditions influenced the type of damage. Maritime pine was compared to Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using the species relationships for Scots pine in GALES, but the size characteristics as input were generated by PP3. The difference in CWS was found to be small between the two species. More studies are needed to improve the calibration of the aerodynamic model in GALES, taking into account the high spacing and management practices used in the Landes de Gascogne region.

Keywords: wind risk assessment model, tree growth model, critical wind speed, tree stability, root anchorage

Introduction Wind damage to trees is considered as a major problem, particularly in managed forests where it can result in huge economic losses. Typical winter gales as occasional severe storms can result in a loss of timber (Quine et al., 1995). Wind speed is regarded as the most contributing factor to windthrow. However topography, soil conditions, silviculture treatments and stand structure are also factors determining a stand's resistance to wind loading (Fraser, 1962; Somerville, 1980; Oswald and Aussenac 1988; Valinger et al., 1994; Finnigan and Brunet, 1995; Quine et al., 1995; Cooper et al., 1996; Ray and Nicoll, 1998; Moore, 2000; Moore and Quine, 2000; Cucchi and Bert, 2003).

In recent years, different types of tools have been developed in order to assist foresters with the estimation of a stand's resistance to windthrow. The simplest stability indicator uses single tree or stand dimensions e.g. stem taper (tree height

divided by the diameter at breast height (DBH)). Pardé and Bouchon (1988) considered stands as windfirm for a mean height to mean DBH ratio < 80 , and as unstable > 100 . Using a plot of this ratio against stand dominant height, Becquey and Riou-Nivert (1987) defined three stability zones for stands - stable, not very stable and unstable - through observations carried out after a severe storm in 1982. More complex and elaborate tools consider the tree or stand characteristics and the windiness of a site, e.g. the Windthrow Hazard Classification (WHC) used in Great Britain (Miller, 1985).

The last type of decision support tool for foresters are probabilistic systems that quantify the likelihood of wind damage to a stand: statistical models have been developed using empirical observations on damage collated over a number of years in selected areas (Valinger and Fridman, 1999; Mitchell et al., 2001). These models predict wind risk in observed forests, which can have a complex structure e.g. heterogeneous stands, but they cannot be extrapolated to other locations. On the contrary, deterministic (mechanistic) models work only for homogeneous stands i.e. even-aged and monospecific, but can be adapted to other species and site conditions. Such models, developed in Northern Europe, calculate the critical wind speed required to damage a stand, which can be subsequently compared to the local wind climatology (Peltola and Kellomaki, 1993; Gardiner et al., 2000).

Among the deterministic models, the Geographical Analysis of the Losses and Effects of Storms in Forestry (GALES) developed by the Forestry Commission replaces the old WHC system. The GALES model estimates the threshold wind speeds required for overturning and breaking the mean tree of a stand (Gardiner et al., 2000). As in other computed-based systems (Peltola et al., 1999; Valinger and Fridman, 1999; Gardiner and Quine, 2000; Päätaalo, 2000; Ni Dhubhain et al., 2001;

Mitchell et al., 2001), the decision support system ForestGALES, using GALEs, predicts the wind damage risk for 18 different coniferous species growing in the silvicultural conditions found in Northern Europe. Using this software, foresters can then choose a silvicultural strategy in terms of wind vulnerability.

Since the December 1999 storm which swept through Western Europe, French forest research has focussed on how to better manage forest stands with regards to windthrow. Our first aim was to construct a wind risk assessment model for Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands in SW France, where this species is intensively cultivated in on over 890,000 ha of land. It was decided to adjust the GALEs model to Maritime pine and hence integrate this species into the decision support system ForestGALES.

GALES requires knowledge of stand characteristics and the mechanical behaviour of a species according to different silvicultural conditions. In order to obtain size characteristics of stands used as input to the model, yield tables or/and growth models may be used. Compared to yield tables, growth models are hugely

preferable, as it is possible to simulate as many silvicultural scenarios as necessary. An growth model, PP3, exists for Maritime pine (Lemoine, 1991; Salas-González et al., 2001), and is currently implemented in the software CAPSIS (Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture) (de Coligny et al., 2003). The second aim was to create a new wind risk management tool by connecting ForestGALES and CAPSIS. The model was then tested by simulating the risk of Maritime pine stands to windthrow.

Material and methods

In order to include Maritime pine in GALEs, we used data from previous tree winching tests carried out on two types of soil conditions, i.e. trees growing on sandy podzol with or without a hard pan horizon (Cucchi et al., 2004). Data were obtained for 74 trees sampled from the interior of seven stands, ranging in age from 15 - 50 years, with a DBH of 12.9 - 56.0 cm and a height of 10.6 to 27.8 m.

Table 1 Models for Maritime pine crown dimensions implemented into the ForestGALES software

	Dependant variable y	Tree independent variable(s) x	Model / estimated parameters	R ²	RMSE	Approx. std error
Global non linear relationship	HFLB (m)	DBH (cm) height (m) age (year)	p1 = 0.0943 p2 = 5.4597	.	72.93	0.0168 0.5693
Non linear relationship for trees growing on soil with a hard pan	HFLB (m)	DBH (cm) height (m) age (year)	p1 = 0.0870 p2 = 5.7049	.	50.05	0.0254 0.8224
Non linear relationship for trees growing on soil without a hard pan	HFLB (m)	DBH (cm) height (m) age (year)	p1 = 0.1366 p2 = 4.5154	.	44.25	0.0242 0.7676
Global linear regression	Crown width (m)	DBH (cm)	y = 0.15674 x	0.97	0.83	0.0035

Morphological models and species-dependant parameters to adjust GALES to Maritime pine

Tree morphological models in GALES must use tree characteristics as independent variables. The bending moment generated by a given wind speed is determined as a function of tree size and crown dimensions in order to calculate wind load on the tree. Crown dimensions are described by crown width and crown length. Crown length was calculated by subtracting the mean height of the first living branch to the mean total height of the tree. The height of the first living branch (HFLB) can be described as (Meredieu, 1998):

$$HFLB = (\text{height} - 1.3) \exp \left[- \left(p1 + \frac{p2}{\text{Age}} \right) \left(\frac{DBH}{(\text{height} - 1.3)} \right) \right]$$

where height is the total height of the tree, DBH is tree diameter at breast height and age is the total tree age. The p1 and p2 parameters (Table 1) were determined for all the sampled trees and the two soil conditions - with or without a hard pan - using the non linear technique of SAS software (Proc NLIN, SAS, 1988).

Crown width corresponds to the horizontal maximal crown extension facing the prevailing winds. This extension is the sum of the two horizontal lengths between the stem and the maximal extension points of the crown (Cucchi et al., 2004). Crown width was predicted by a linear regression, using DBH as the independent variable (Table 1). Analysis of covariance showed that regressions predicting crown width did not differ significantly according to soil conditions ($p > 0.05$). Only a global linear regression was calibrated.

In order to calculate the total bending moment, GALES adds the effect of the overhanging mass of the crown to the bending moment due to wind loading. To estimate the crown biomass, GALES requires both crown dimensions and

density. This last variable represents the ratio between the biomass of the living crown and its volume expressed as kg/m^3 . Biomass data were taken from Cucchi et al. (2004). To estimate volume, we assumed that the crown is a fat cone, where basal diameter is equal to crown width and the height is equal to crown length. In our sample, a mean crown density value of $2.73 \pm 0.86 \text{ kg.m}^{-3}$ was found. No significant differences by Analysis of Variance between trees growing in different soil conditions were found ($p > 0.01$).

To calculate the critical moment required to break the mean tree, GALES needs the Modulus Of Rupture (MOR) of clear green wood and the knot factor (dimensionless), which are species-dependent parameters. We took the two parameters available for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), a species similar to Maritime pine and already incorporated into the GALES model (Gardiner et al., 2000). A knot factor of 0.85 takes into account the defects in the wood, which decrease the MOR of clear green wood. Therefore, the clear green wood MOR of 46 MPa for Scots pine (Lavers, 1969) is equivalent to 39.1 MPa for green wood with defects.

As the bending of a tree stem during wind loading is proportional to the elasticity of the stem wood (Gardiner et al., 2000), GALES requires the value of the Modulus Of Elasticity (MOE) according to the species. As for the value of MOR, we used the MOE available for Scots pine, i.e. 7000 MPa (Peltola et al., 1999), which was used to calculate displacement of the stem and crown during leaning.

Values of stem green wood density were used to determine stem biomass needed to calculate the critical overturning moment (TM_{crit}). For Maritime pine, a mean value of green wood density of $903.4 \pm 58.3 \text{ kg.m}^{-3}$ (minimal value: 719.1 kg.m^{-3} ,

maximal value: 1069.5 kg.m^{-3}) was calculated for winched pines (Cucchi et al., 2004). No significant differences by Analysis of Variance between trees growing in different soil conditions were found ($p > 0.01$).

Certain species-dependent information concerning the aerodynamic characteristics of a forest stand is necessary as input to GALES, e.g. the drag coefficient of the species. Such data are obtained by carrying out wind tunnel studies (Mayhead, 1973). No such study has yet been carried out on Maritime pine. The streamlining (St , dimensionless) is calculated from:

$$St = c u^{-n}$$

where $c = 3.07$ and $n = 0.75$ corresponding to the aerodynamic parameter values available for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) (Gardiner et al., 2000). The streamlining takes into account the reduction of the frontal area of the crown for a wind speed of u (m.s^{-1}).

Prediction of the critical turning moment for an average tree in a stand depending on soil conditions

In GALES, the critical overturning moment TM_{crit} is predicted by a linear regression using stem weight. The TM_{crit} versus stem weight regression is forced through zero, as the bending moment required to uproot a zero stem weight tree approaches (Gardiner et al., 2000). Two values of the regression parameter C_{reg} (in Nm.kg^{-1}) were obtained depending on soil conditions, as the covariance analysis showed a significant difference between the two regressions "with a hard pan" and "without a hard pan" ($p < 0.01$):

- for trees growing on soil with a hard pan:
 $TM_{\text{crit}} = 125.8 \times \text{Stem Weight} \quad (1)$
 $R^2 = 0.94$

- for trees growing on soil without a hard pan:

$$TM_{\text{crit}} = 168.8 \times \text{Stem Weight} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.98$$

where TM_{crit} is in Nm and Stem weight in kg. Stem weight is estimated by GALES using total tree height, crown length, DBH and stem wood density (B. Gardiner, pers. comm.).

Another regression was calibrated for trees whatever the soil condition (global):

$$TM_{\text{crit}} = 144.5 \times \text{Stem Weight} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.95$$

C_{reg} is a species and soil dependent parameter. Within the ForestGALES software, the distinction of soil condition type was made using two pre-existing options: soil type and drainage. For Maritime pine, only the "sandy podzol" soil type is considered. In the case of Maritime pine, the drainage option was chosen as an indicator of the presence or absence of a hard pan. "Drainage = good" was linked to the soil condition "without a hard pan", "Drainage = average/poor" was linked to the soil condition "with a hard pan" and "Drainage = unknown" was linked to the global regression.

Software connection between ForestGALES and CAPSIS

The CAPSIS platform that hosts PP3 (de Coligny et al., 2003) can easily expand its features with the integration of new tools to solve specific problems. The link between CAPSIS and ForestGALES follows a loose-coupling approach based on file exchange. The files contain the information required to estimate the probabilities of wind damage extracted from PP3 and the results calculated by ForestGALES. With this method, it is possible to simulate multiple scenarios with changes in the forest stand parameters.

After the creation of a CAPSIS-PP3 project (silvicultural scenario), the

Table 2 Stand characteristics every 5 years between 20 - 50 years in each silvicultural scenario generated by CAPSIS and used for windfirmness comparisons

Scenario	Age (years)	Density (stem/ha)	Volume (m ³ /ha)	Dominant height (m)	Dominant DBH (cm)	Height of the mean tree (m)	DBH of the mean tree (m)
S1	20	1250	215.68	14.55	24.43	13.65	20.33
	25	850	291.38	17.44	30.13	16.61	25.90
	30	560	342.54	19.85	35.40	19.10	31.36
	35	410	375.86	21.87	40.26	21.21	36.32
	40	300	382.25	23.61	44.77	23.07	41.21
	45	300	469.15	25.09	48.88	24.46	44.51
	50	300	554.73	26.36	52.61	25.71	47.46
S2	20	1500	240.31	14.54	24.18	13.48	19.46
	25	1250	351.65	17.39	29.40	16.29	23.95
	30	850	432.56	19.85	34.32	18.88	29.08
	35	560	450.25	21.86	39.00	21.05	34.25
	40	410	462.33	23.62	43.39	22.89	38.92
	45	300	450.37	25.11	47.51	24.53	43.57
	50	300	534.94	26.35	51.27	25.75	46.56
S3	20	1250	246.64	15.63	25.26	14.72	21.04
	25	850	333.44	18.64	31.04	17.78	26.65
	30	560	383.79	21.17	36.39	20.46	32.18
	35	410	416.93	23.33	41.33	22.65	37.2
	40	300	421.69	25.14	45.92	24.53	42.15
	45	300	515.04	26.65	50.09	25.94	45.48
	50	300	606.44	27.94	53.88	27.12	48.43

connection tool is launched. During this connection, CAPSIS creates an input "fgi" file, then launches ForestGALES in the way of an executable file, waits until it is finished and processes the output "fgo" file. CAPSIS sends one data line in the file for each stand in the simulation history. Line format is: identification of the stand (standId), certain codes (speciesCode, soilCode, cultivationCode, drainageCode), height of the stand mean tree (= tree with quadratic mean DBH) (Hg), quadratic mean DBH of the stand (Dg), mean

distance between trees (spacing). ForestGALES returns the probability and critical wind speed for breakage and overturning for all stands in the simulation history. This information is finally stored in the CAPSIS project in order to be analysed by CAPSIS tools (viewers and graphics).

Critical wind speed simulations for virtual even-age monocultural stands of Maritime pine

Simulations were performed using the ForestGALES/CAPSIS connection. Virtual stands of Maritime pine were generated with the PP3 growth model, corresponding to realistic stand characteristics found in the south west of France. Three silvicultural scenarios were generated, referenced hereafter as S1, S2 and S3, with selective low thinning (Table 2). As a stand was thinned by removing the smallest trees, this thinning involved a technical increase in mean DBH and mean Height. All the simulations began at 20 years. Due to the plasticity of their stems, young pines under 20 years old bent and failed during winching, and could not be uprooted easily (Stokes, 1999; Cucchi et al., 2004).

Silvicultural scenarios S1 and S2 were made using the same fertility index, which is Dominant height at 40 years old but differed in initial stem density and number of thinning. Scenario S3 was the same as S1 using a higher fertility index for simulations. Thinning occurred four times between 20 and 40 years-old. We ran the GALES model on stands generated according to S1, S2 and S3 using for each scenario the three possible choices of soil condition: "global" (corresponding to equation 3), "with a hard pan" (corresponding to equation 1) and "without a hard pan" (corresponding to equation 2). The critical wind speeds for overturning and breakage were simulated according to each age of the scenarios (Table 2).

Results

Predictions according to silvicultural scenario

Results of simulations carried out with the global regression (equation 3) showed that the critical top wind speed decreased with age regardless of the silvicultural scenario

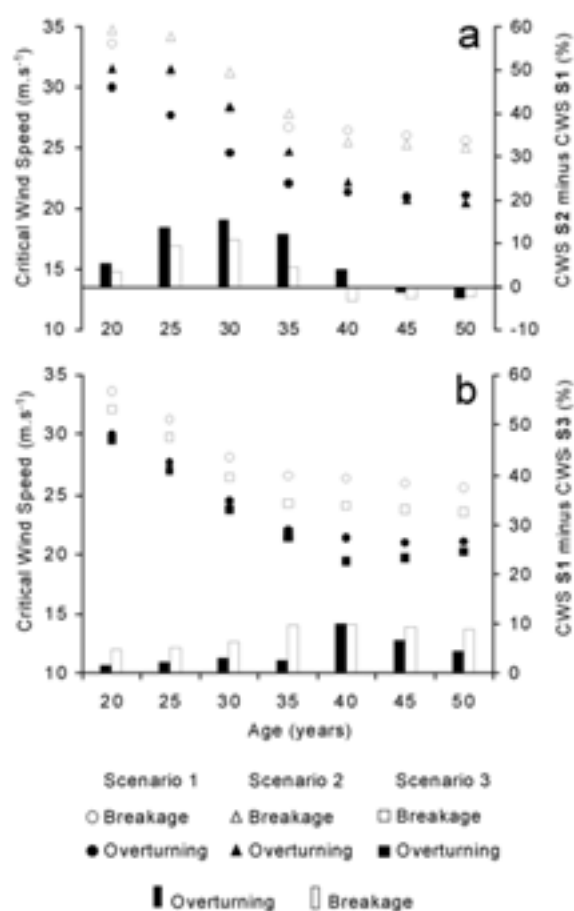


Fig. 1 Predicted critical wind speeds (points) for breakage and overturning with "global" option for the three silvicultural scenarios according to stand age, and differences in predictions (bars) between scenarios (a) S2 - S1, and (b) S1 - S3. A positive value of the bars indicates a higher critical wind speed predicted for S2/S3, and a negative value a higher critical wind speed predicted for S1

(Figures 1a, b). However, from an age of 40 years and upwards, in Scenarios 1 and 3, and 45 in Scenario 2, the critical top wind speed (CWS) for both types of damage became nearly stable. CWS for breakage was always higher than for overturning whatever the silvicultural scenario. Therefore, predicted damages for the three scenarios mainly concerned uprooted trees. The CWS was 30 -35 m.s^{-1} at 20 years for both overturning and stem breakage, and 20 - 21 m.s^{-1} and 23 - 26 m.s^{-1} for overturning and stem breakage respectively at 50 years.

The main differences between the two silvicultural scenarios S1 and S2 resulted in the number of trees per ha and the intensity of the first thinning, which is higher in S1 (Table 2). The final number of trees was the same in both scenarios. The predicted overturning CWS for S1 was lower than for S2 after 45 years (Figure 1a). Above that age, CWS for S1 was greater than for S2. For S1, the CWS decreased after 20 years, for S2, the maximal overturning CWS was stable until 25 years. S1 reached the minimal overturning CWS at 40 years and S2 at 45 years. In order to obtain relative results between the two tested scenarios, the difference was expressed as a percentage of [CWS of S2 minus CWS of S1], for each type of damage (Figure 1a). For both overturning and breakage, the results showed that between 20 - 40 years, this difference increased, reaching 13.5% at 30 years, before then decreasing. From 45 years onwards, the mean difference was only -2.1%. With regards to stem breakage, the CWS curve trends were the same compared to overturning, but with smaller differences. At 30 years, the maximal difference was 10.8%. From 40 - 50 years, the mean difference was -2.8%. At 40 years, the difference for stem breakage was -3.4% and for overturning + 4%. Overall, the difference between S1 and S2 for overturning was higher than for breakage. Whatever the type of damage, S2 was more resistant than S1 throughout the life of the stand. However, at 40 - 45 years, this difference was negligible.

The effect of the fertility index on predicted CWS was studied using the same patterns of thinning and density (Table 2). The silvicultural scenario S1 was again simulated using a different fertility index (see S3 in Table 2). Higher fertility resulted in larger mean DBH and height for S3, but with the same spacing in S1 and S3. The predicted CWS for S3 was lower than for S1 at each step of the scenarios,

both for overturning and stem breakage (Figure 1b). The mean difference in CWS for overturning [CWS of S1 minus CWS of S3] was only 2.5% at 20 - 35 years, and on the whole quite stable. However, from 40 years onwards, this difference increased, reaching a maximum of 9.9%; before then decreasing around 50 years. The minimal CWS for S3 was 19.5 m.s^{-1} . With regards to stem breakage, the difference between S1 and S3 increased to 9.7% at 40 years, then stabilised out at 9.3% up to 50 years. In general, the difference in CWS between S1 and S3 was lower for overturning than for stem breakage. S1 was as resistant as S3 from 20-35 years. At 40 years, S1 was more resistant than S3.

The difference between the CWS predicted for the three scenarios was higher for the effect of stand density than for that of fertility index.

Predictions according to soil conditions

The two CWS for each scenario S1, S2 and S3 were simulated with the two other possible soil conditions (Figures 2, 3). Changing soil conditions involve modifications of C_{reg} parameter and predicted crown length. The difference for overturning CWS (Figures 2a, 2b) was positive between the options "global" and "with a hard pan" and negative between the options "global" and "without a hard pan". Regardless of the scenario, the CWS were rated as "without a hard pan" corresponding to the highest values, "global" corresponding to mean values and "with a hard pan" corresponding to the lowest values. The differences between soil drainage conditions followed the values of the C_{reg} parameter, $C_{\text{reg}} = 168.8$, $C_{\text{reg}} = 144.5$ and $C_{\text{reg}} = 125.8$, for inner trees growing on soil without a hard pan, for inner trees whatever the soil condition and for inner trees growing on soil with a hard pan respectively. According to Gardiner et al. (2000), influence of crown length value modification was considered

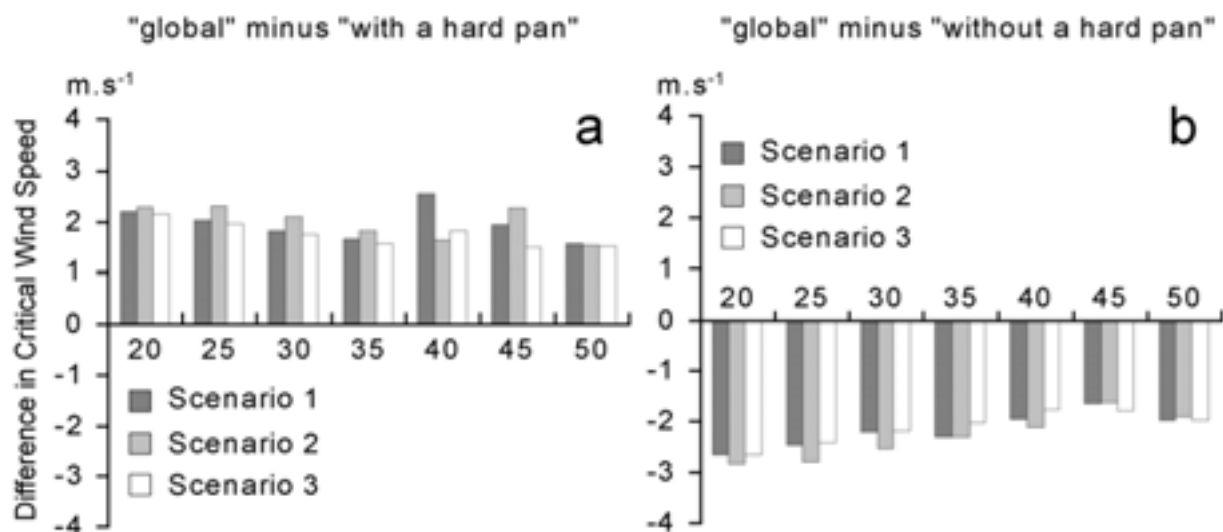


Fig. 2 Differences in critical wind speed required to overturn a stand according to its age for each silvicultural scenario (a) "global" minus "with a hard pan" options, and (b) "global" minus "without a hard pan" options

as negligible. Therefore, an increase of 19 Nm.kg^{-1} (i.e. 14.8%) in C_{reg} between the "with a hard pan" and the "global" options resulted in a mean increase of $1.9 \text{ m.s}^{-1} \pm 0.3$ (i.e. $8.6\% \pm 1.6$) in overturning CWS, for all the scenarios. Similarly, an increase of 24 Nm.kg^{-1} (i.e. 16.8%) between the "global" and the "without a hard pan" options resulted in a mean increase of $2.2 \text{ m.s}^{-1} \pm 0.4$ (i.e. $9.0\% \pm 0.5$) in overturning CWS, for all the scenarios. However, the difference in CWS was not constant or linear with silvicultural age. The differences between the scenarios were small, except at 40 years between "global" and "with a hard pan" for S1. The difference then reached 2.54 m.s^{-1} . Therefore, wind sensitivity of stands on soil with a hard pan could be higher, independent of the C_{reg} value.

The difference in CWS between breakage and overturning on soil without a hard pan increased until 40 or 45 years old, and then decreased again (Figure 3). For S2 and S3 up to 35 years, the difference was $<1 \text{ m.s}^{-1}$. Therefore, on soil without a hard pan, breakage can be just as frequent as overturning for these silvicultural scenarios at a young age. After 35 years, a higher wind speed was required for stem breakage

compared to that needed for overturning. On the contrary, for S1 CWS for breakage was the highest, with a difference $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$.

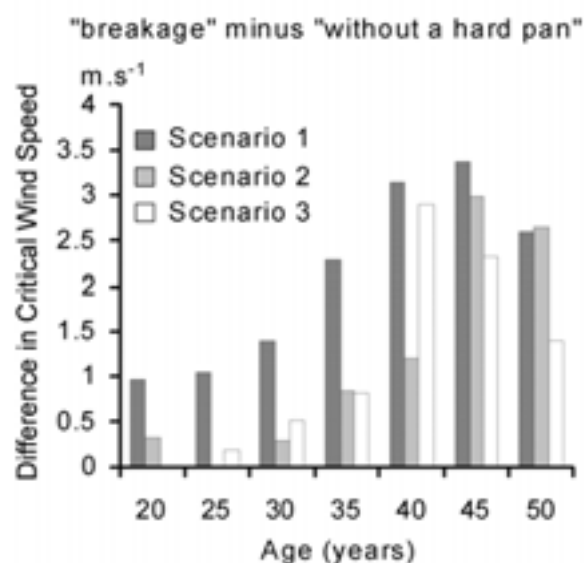


Fig. 3 Differences between stem breakage and overturning critical wind speeds for the "without a hard pan" option, according to stand age for each silvicultural scenario. Predictions for breakage are the same whatever the soil conditions

Predictions according to tree species

Spacing, mean height and mean DBH values obtained with the scenarios S1, S2

and S3, generated previously by PP3, were also used as input for simulations with Scots pine as species option in the ForestGALES software. These simulations were performed with the ForestGALES "Batch file" mode. Dendrometric and mechanistic relationships and parameters were changed for Scots pine:

$$C_{reg} = 134$$

$$\text{Crown Length (m)} = 0.557 \times \text{Mean Height (m)} - 1.83$$

$$\text{Crown Width (m)} = 0.146 \times \text{DBH (m)} - 0.097$$

$$\text{Crown density} = 2.5 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\text{Stem green wood density} = 850 \text{ kg.m}^{-3}$$

Knot factor, MOR and MOE, and drag coefficients were the same for both species. The options were "podzol" for soil type and "notched planting" for cultivation type as for Maritime pine, and "average" for soil drainage conditions, corresponding to the "global" option for Maritime pine.

The crown length of simulated stands differs strongly between the two species (Figure 4). In young trees, Maritime pine had a longer predicted crown length than Scots pine. This crown length increased with age. However, the proportion of

length occupied by the crown on the total stem (relative crown length) was less in older trees compared to young trees. For Scots pine, this relative crown length did not change as much and increased with age.

The trend in CWS for the two species were similar whatever the scenario (Figures 5a, b). The CWS for Maritime pine was always higher than for Scots pine. Mean overturning CWS required for Maritime pine was $1.3 \pm 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ higher than for Scots pine, with a minimum of 0.76 and a maximum of 2.61. The two curves were arranged according to the C_{reg} values. The same results were observed for each when soil conditions differed. Differences in relationships with regards to crown dimensions or other parameters seemed to have a little impact on these simulations.

Discussion

The mean critical wind speed of 20 - 35 m.s^{-1} obtained by our simulations for trees within a stand seem reasonable, and are comparable to wind speeds observed in the Landes region during winter storms. A maximal immediate wind speed of 36.9 m.s^{-1} was measured at Bordeaux for the storm of 1976 (Doll, 1988), and a value of 47.2 m.s^{-1} occurred during the highly devastating storms of 1999 (Météo-France data). Nevertheless comparisons between the critical wind speed predicted by GALES and the amount of damage in real stands is difficult, as in most cases the real wind speed acting on the stand has not been measured.

Our simulations showed an increase in sensitivity to wind with stand age, similar to observations by several authors (Lohmander and Helles, 1987; Ruel and Benoit, 1999), or results using tree stability models (Ancelin et al., submitted). This

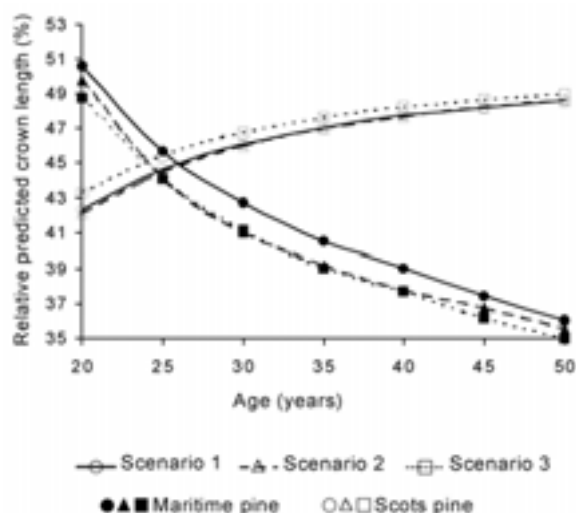


Fig. 4 Comparison between relative predicted crown lengths (proportion of length occupied by the crown on the total stem) according to tree age using the Scots pine model of GALES and the model implemented for Maritime pine, for each silvicultural scenario

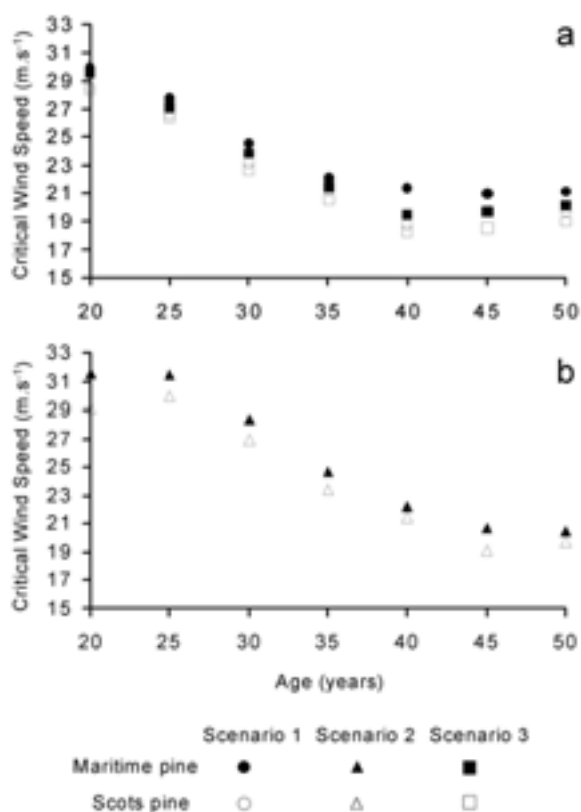


Fig. 5 Predicted critical wind speeds for overturning with "global" option for Maritime pine and "drainage = average" for Scots pine according to stand age (a) for S1 and S3 which have the same pattern of thinning, and (b) for S2

increase in sensitivity was related to an increase in tree top height (Cremer et al., 1982; Becquey and Riou-Nivert, 1987; Peltola and Kellomaki, 1993; Ni Dhubhain et al., 2001). A levelling off in CWS after 40 - 45 years was also observed which may be linked to the relative increase in radial growth, compared to stem height, as suggested by Quine (1995) and Ni Dhubhain et al. (2001). However, we cannot determine if sensitivity to wind is due to one particular variable, or several, as height, DBH and spacing all varied in the model.

With regards to the soil conditions, our simulations showed that trees are usually uprooted at the age 35 - 50 years. On soil with a hard pan, overturning was also observed up to 35 years, whereas on soil

without a hard pan, breakage and overturning can occur equally, as also demonstrated in field measurements on Maritime pine of different ages (Stokes, 1999; Cucchi et al., 2004).

Stem taper (H/DBH) for Maritime pine was lower (55 - 69) compared to Norway spruce (*Picea abies* L.) or Scots pine (80 - 120) (Gardiner et al., 2000). Low taper has been considered as an indicator of higher sensitivity to wind (Cremer et al., 1982; Becquey and Riou-Nivert, 1987; Valinger and Fridman, 1999). In stands with a high density, trees are less tapered, therefore individual tree resistance decreases. In S2, which had the highest density, trees were less tapered compared to S1. However, the scenario S2 was more resistant up to 45 years. This high resistance was also found by Moore and Quine (2000), testing ForestGALES on Sitka spruce and Radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations. One reason for this increase in stability for stand with high tree density may be that wind penetrates less easily into the stand, due to the lower spacing between trees (Talkkari et al., 2000). In a forest, crown damping will therefore be greater, thus dissipating wind energy more easily, and root interlocking may also occur between trees, which will increase resistance to overturning (Smith et al., 1987). Cucchi and Bert (2003) found similar results in 50 years old plantations of Maritime pine after the 1999 storm i.e. less damage occurred in high density stands compared to certain stands with a lower density. The difference in sensitivity to wind between S1 and S2 disappeared at 45 years, when spacing became equal between the two scenarios. Therefore, the resistance was defined only by tree size characteristics, and mainly by taper value.

The simulation S3, with a higher fertility index, was less resistant to wind compared to S1 particularly for age >35 years. Similar results were obtained for simulations with ForestGALES on *Abies balsamea* (L.) Mill. by Ruel et al. (2000),

who showed that stands where site quality was better, were less windfirm. In our simulations, site quality was expressed as stand dominant height. Stokes et al. (1997) explained that high levels of fertilisation may result in increased shoot growth at the expense of root growth and anchorage. The difference in CWS between S1 and S3 was greater for stem breakage than for overturning, as calculation of the critical moment required for causing failure in the stem uses DBH to the third power (Gardiner et al., 2000).

With regards to soil conditions, a 14.8% - 16.8% increase in C_{reg} resulted in an 8 - 9% increase in overturning CWS. These results are similar to those found by Ancelin et al. (submitted), who showed that a 20% increase in C_{reg} led to a 12.5% increase in overturning CWS. The variation in C_{reg} could also change the predicted type of damage. A higher C_{reg} parameter, as for tree growing in soil without a hard pan, gave a higher TM_{crit} , resulting in a higher CWS. In trees with a small DBH, and particularly young trees, the critical moment required for breakage was even smaller, as DBH was raised to the third power. Therefore, the breakage CWS will be lower than the overturning CWS. Where C_{reg} is high, breakage occurred before overturning as in S2 and S3 for age <30 years.

Scots pine is less resistant to overturning than Maritime pine, when mean DBH, height and spacing are equal. However, this difference is small with regards to the high disparity in relationships and parameters between the two species. The $5.8 \pm 2.3\%$ increase in CWS corresponded to a 7% increase in C_{reg} , which explained 65% of the difference. The crown density increase of 9.2% and the crown width increase of 10% resulted in a higher sensitivity to wind in Maritime pine. Therefore, crown width and length had a negligible impact on simulations due to the sensitivity of the GALES model (Gardiner

et al., 2000). It is also the case for crown length. However, even if the high disparity in predicted crown length between Maritime and Scots pine had no observed effects on simulations with low spacing, in fact this difference may have larger consequences for simulations where spacing is greater. Gardiner et al. (2000) argued that increased spacing allows a higher penetration of wind into the stand, thus trees are more exposed to wind loading, and crown dimensions may play a more important role in the calculation of maximal bending moment. The drag coefficient should also be adjusted for Maritime pine though data obtained from wind tunnel studies (Mayhead, 1973), in order to limit errors in the case of higher spacing.

Except for the drag coefficient value, the aerodynamic model in GALES is not species dependant. The empirical gust factor, which is the most important factor controlling the magnitude of the wind loading (Gardiner et al., 2000), was established from a small number of wind tunnel studies and field experiments, using Sitka spruce to calibrate the data (Gardiner et al., 1997). This factor used normalised bending moments measured on a model forest with a spacing of 1.7 m. Therefore, the aerodynamic model in GALES does not yet take into account the low stand density for Maritime pine used in the Landes de Gascogne region.

In conclusion, the connection between CAPSIS-PP3 and ForestGALES appears to function correctly. CAPSIS-PP3 can also generate the size characteristics of each tree in a stand. Therefore by using simultaneously tree size characteristics for the calculation of bending and critical moments, and stand dimensions for the aerodynamic model, CWS may be calculated for each tree in a stand. Therefore, the variability of CWS in a given stand can be obtained. However, the

variability in MOR, knot factor, wood density and crown density have to be estimated according to tree size and silvicultural conditions. PP3 can calculate these variables, and could send them to GALES as the size characteristics. The variability of the C_{reg} parameter within a stand observed by Cucchi et al. (2004) should be integrated when making predictions at the tree level. Exposure of the tree according to prevailing winds had a particularly significant influence on C_{reg} estimation (Cucchi et al., 2004).

This type of wind risk model takes into account the growth of the stand by considering the aerial dimensions of a representative tree, but cannot yet include information on either root system architecture or tree adaptation to wind loading (Stokes et al., 1995). Such adaptive growth can be observed especially in upwind edge trees (Mickovski and Ennos, 2002). As the root-soil plate size and root system architecture are important components of tree stability (Coutts, 1983; Coutts et al., 1999), models of root anchorage (Dupuy et al., submitted) should be integrated in the future.

Acknowledgements This research was supported by GIP ECOFOR (contract n° 2002.09). The authors thank D. Bert (INRA, Unité EPHYSE, France), B. Courbaud (CEMAGREF, Grenoble, France), A. Denis (CDGA, Université Bordeaux 1, France), R. Lastennet (CDGA, Université Bordeaux 1, France), M. Najar (Afoce Sud-Ouest, France) for their participation in the CapForêt project, D. Guyon (INRA, Unité EPHYSE, France) and S. Dupont (INRA, Unité EPHYSE, France) for their valuable suggestions on the manuscript, and T. Fourcaud (CIRAD, LRBB, Bordeaux, France) and P. Ancelin (CEMAGREF, Grenoble, France) for their helpful comments and discussion.

References

- Ancelin, P., Courbaud, B., Fourcaud, T., 2004. Predicting partial wind damage in a population of trees using an individual based mechanical model. Submitted to For. Ecol. Manage.
- Becquey, J., Riou-Nivert, P., 1987. L'existence de "zones de stabilité" des peuplements, conséquences sur la gestion. Rev. For. Fr. 39, 323-334.
- Coligny de, F., Ancelin, P., Cornu, G., Courbaud, B., Dreyfus, P., Goreaud, F., Gourlet Fleury, S., Meredieu, C., Saint André, L., 2003. CAPSIS: Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture: Advantages of a shared forest-modelling platform. In: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), Modelling Forest Systems. CABI Publishing, Wallingford, pp. 319-323.
- Cooper, K.R., Ruel, J.C., D., P., 1996. Wind tunnel measurements of the surface winds on a model of the Montmorency forest to investigate the effect of topography on the windthrow of trees. National Research Council of Canada, Ottawa.
- Coutts, M.P., Nielsen, C.C.N., Nicoll, B.C., 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. Plant Soil 217, 1-15.
- Coutts, M.P., 1983. Root architecture and tree stability. Plant Soil 71, 171-188.
- Cremer, K.W., Borough, C.J., McKinnell, F.H., Carter, P.R., 1982. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. N.Z. J. For. Sci. 12, 244-268.
- Cucchi, V., Bert, D., 2003. Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. Ann. For. Sci. 60, 209-226.
- Cucchi, V., Meredieu, C., Stokes, A., Berthier, S., Bert, D., Najar, M., Denis, A., Lastennet, R., 2004. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different

- podzolic soil conditions. *Trees* 18, 460-466.
- Doll, D., 1988. Les cataclysmes météorologiques en forêt. PhD Thesis, No. 38-731, Université Lumière Lyon 2, France.
- Dupuy, L., Fourcaud, T., Stokes, A., 2004. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *Eur. J. Soil Sci.* (Accepted).
- Finnigan, J.J., Brunet, Y., 1995. Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. In: Coutts, M.P., Grace, J. (Eds.), *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3-40
- Fraser, A.I., 1962. The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35, 117-127.
- Gardiner, B.A., Peltola, H., Kellomaki, S., 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecol. Modell.* 129, 1-23.
- Gardiner, B.A., Quine, C.P., 2000. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds. *For. Ecol. Manage.* 135, 261-277.
- Gardiner, B.A., Stacey, G.R., Belcher, R.E., Wood, C.J., 1997. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70, 233-252.
- Lavers, G.M., 1969. The strength properties of timbers. Forestry Production Research Laboratory, London.
- Lemoine, B., 1991. Growth and yield of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait): the average dominant tree of the stand. *Ann. For. Sci.* 48, 593-611.
- Lohmander, P., Helles, F., 1987. Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scand. J. For. Res.* 2, 227-238.
- Mayhead, G.J., 1973. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agric Meteorol* 12, 123-130.
- Meredieu, C., 1998. Croissance et Branchaison du Pin laricio (*Pinus nigra* Arn. ssp. laricio (Poir.) Maire): Élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la prévision de caractéristiques des arbres et du bois. PhD Thesis, No. 242-98, Université Claude Bernard Lyon 1, France.
- Mickovski, S.B., Ennos, A.R., 2002. A morphological and mechanical study of the root systems of suppressed crown Scots pine *Pinus sylvestris*. *Trees* 16, 274-280.
- Miller, K.F., 1985. Windthrow Hazard Classification. Forestry Commission, London.
- Mitchell, S.J., Hailemariam, T., Kulis, Y., 2001. Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. *For. Ecol. Manage.* 154, 117-130.
- Moore, J.R., 2000. Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *For. Ecol. Manage.* 135, 63-71.
- Moore, J., Quine, C.P., 2000. A comparison of the relative risk of wind damage to planted forests in Border Forest Park, Great Britain, and the Central North Island, New Zealand. *For. Ecol. Manage.* 135, 345-353.
- Ni Dhubhain, A., Walshe, J., Bulfin, M., Keane, M., Mills, P., 2001. The initial development of a windthrow risk model for Sitka spruce in Ireland. *Forestry* 74, 161-170.
- Oswald, H., Aussenac, G., 1988. Stabilité des peuplements et traitements sylvicoles sur les sols hydromorphes. In: INRA-Bordeaux (Eds.), *Conditions et effets des excès d'eau en Agriculture*. INRA, Bordeaux, pp. 145-157.
- Päätaalo, M.L., 2000. Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of

- Scots pine, Norway spruce and birch. *Scand. J. For. Res.* 15, 530-541.
- Pardé, J., Bouchon, J., 1988. *Dendrometrie*, vol. 2. ENGREF, Nancy.
- Peltola, H., Kellomaki, S., Vaisanen, H., Ikonen, V.P., 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.* 29, 647-661.
- Peltola, H., Kellomaki, S., 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27, 99-111.
- Quine, C.P., Coutts, M., Gardiner, B., Pyatt, G., 1995. *Forest and wind: management to minimise damage*. Forestry Commission, London.
- Quine, C.P., 1995. Assessing the risk of wind damage to forest : practice and pitfalls. In: Coutts, M.P., Grace, J. (Eds.), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 379-403.
- Ray, D., Nicoll, B.C., 1998. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71, 169-182.
- Ruel, J.C., Benoit, R., 1999. Analyse du chablis du 7 novembre 1994 dans les régions de Charlevoix et de la Gaspésie, Quebec, Canada. *For. Chron.* 75, 293-301.
- Ruel, J.C., Quine, C.P., Meunier, S., Suarez, J., 2000. Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGales model. *For. Chron.* 76, 329-337.
- Salas-González, R., Houllier, F., Lemoine, B., Pignard, G., 2001. Forecasting wood resources on the basis of national forest inventory data. Application to *Pinus pinaster* Ait. in southwestern France. *Ann. For. Sci.* 58 785-802.
- SAS Institute, Inc., 1988. *SAS Procedures Guide*, Release 6.03 Edition. SAS Institute, Inc., Cary, NC, 441 pp.
- Smith, V.G., Watts, M., James, D.F., 1987. Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 17, 1080-1091.
- Somerville, A., 1980. Wind stability: forest layout and silviculture. *N.Z. J. For. Sci.* 10, 476-501.
- Stokes, A., Fitter, A.H., Coutts, M.P., 1995. Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. *J. Exp. Bot.* 46, 1139-1146.
- Stokes, A., Nicoll, B.C., Coutts, M.P., Fitter, A.H., 1997. Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effects on biomass allocation, root development, and resistance to bending. *Can. J. For. Res.* 27, 1049-1057.
- Stokes, A., 1999. Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant Soil* 217, 17-27.
- Talkkari, A., Peltola, H., Kellomaki, S., Strandman, H., 2000. Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins. *For. Ecol. Manage.* 135, 303-313.
- Valinger, E., Fridman, J., 1999. Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce and birch forests in Sweden. *Environ. Manage.* 24, 209-217.
- Valinger, E., Lundqvist, L., Brandel, G., 1994. Wind and snow damage in a thinning and fertilisation experiment in *Pinus sylvestris*. *Scand. J. For. Res.* 9, 129-134.

IV - 2 Fonctionnement de GALES et ajustement des relations pour le Pin maritime cultivé dans les Landes de Gascogne

IV - 2.1 Fonctionnement du modèle "GALES"

GALES utilise à la fois des relations mécanistes et empiriques. Il prédit la période de retour de la vitesse de vent nécessaire pour ruiner l'arbre de surface terrière moyenne d'un peuplement. Ainsi la prédiction sur le peuplement se fait sur cet arbre moyen seulement. Le modèle suit deux phases de calcul distinctes :

- phase 1 : la prédiction des vitesses critiques nécessaires i) pour déraciner l'arbre moyen du peuplement, ii) pour casser l'arbre moyen du peuplement,
- phase 2 : la prédiction de la période de retour de ces vitesses critiques.

La figure IV - 1 explicite la façon dont travaille le modèle. La phase 1 correspond à la partie de gauche et la phase 2 à la partie de droite.

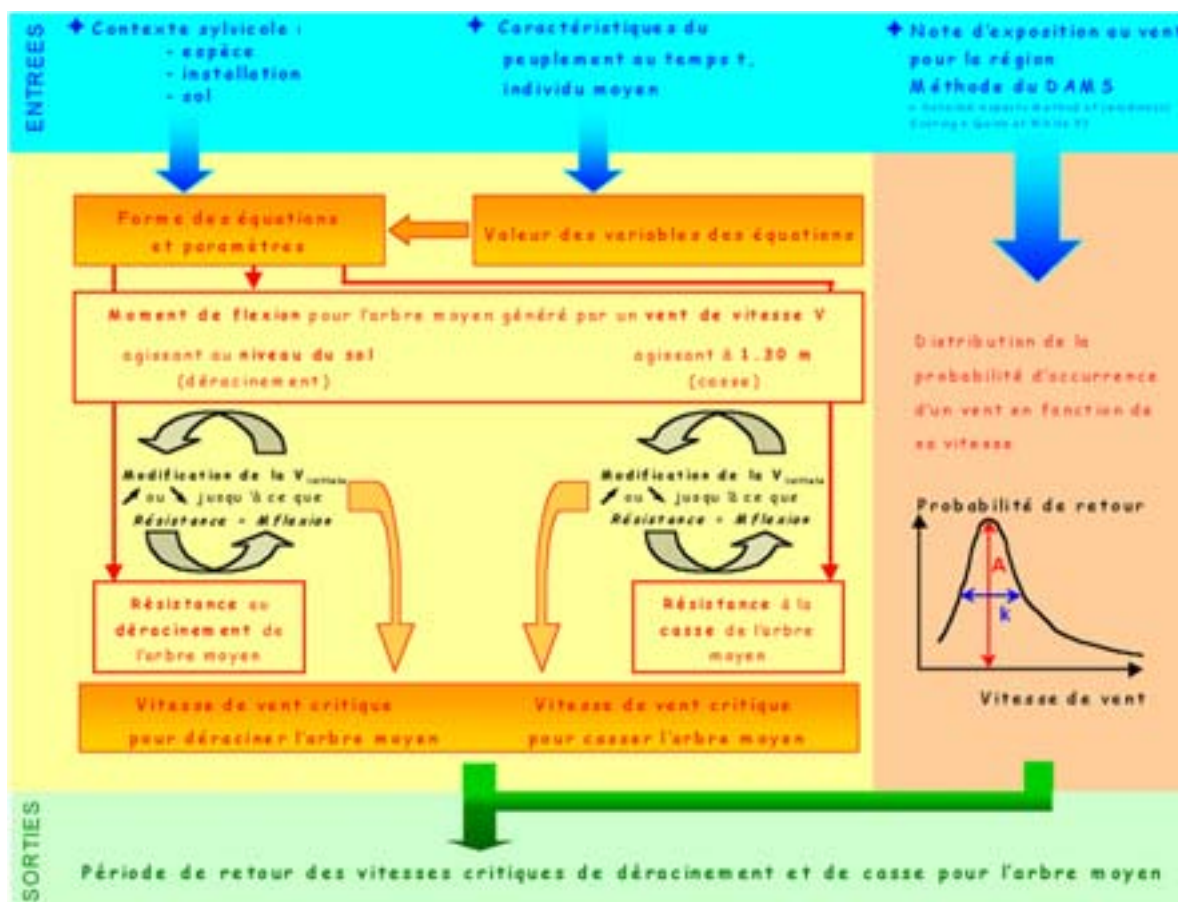


Figure IV - 1 : Schéma représentant le mode de fonctionnement de GALES.

IV - 2.1.1 Phase 1 : prédiction des vitesses critiques

Les choix en entrée (espèce, type de sol, type d'installation, drainage) permettent au modèle de sélectionner la forme des équations et les paramètres correspondants. On obtient une combinaison d'équations et de valeurs de paramètres pour une combinaison de choix. Les caractéristiques du peuplement en entrée (Hauteur et Diamètre à 1.30 m de l'arbre moyen et espacement moyen au sein du peuplement) permettent alors de calculer :

- le Moment de flexion maximal de l'arbre moyen, généré par un vent de vitesse donnée (méthode mécaniste),
- le Moment critique de renversement de l'arbre moyen (méthode empirique) qui représente la résistance de l'arbre au déracinement,
- le Moment critique de casse de l'arbre moyen (méthode mécaniste), qui représente la résistance de l'arbre au bris de tige.

Le calcul du Moment de flexion maximal revient à calculer le profil de vent (de forme logarithmique) qui s'applique sur le peuplement et la réaction de l'arbre moyen à la charge du vent. L'équation 1 est l'expression de ce moment de flexion maximal à la hauteur z tel que calculé dans le modèle (d'après Gardiner *et al.* (2000)) :

$$BM \max(z) = f_{cw} f_{edge} (d - z) \rho G \left[\frac{D u_h k}{\ln\left(\frac{h - d}{z_0}\right)} \right]^2 \quad (IV-1)$$

avec :

- f_{cw} , facteur sans dimension rendant compte du moment additionnel dû au poids de l'arbre,
- f_{edge} , facteur sans dimension rendant compte de l'effet de la création d'une nouvelle lisière,
- d = hauteur d'application de la force sur l'arbre en m,
- ρ = densité de l'air en kg.m^{-3} (1.226),
- G , facteur sans dimension rendant compte de l'effet de rafale associé à la vitesse du vent, qui permet de passer d'un moment de flexion moyen à un moment de flexion maximal pour un vent de vitesse donnée,
- D , espacement moyen entre les arbres en m,
- U_h = vitesse du vent à la hauteur h .
- k = constante de Von Karman (environ 0.4),

- h = hauteur de l'arbre moyen en m,
- z_0 = hauteur sur l'arbre à laquelle la vitesse de vent est nulle,

La hauteur d'application d de la force sur l'arbre et la hauteur z_0 sont fonction de la hauteur de l'arbre, de l'espacement entre les arbres, des dimensions de la couronne (hauteur, largeur) et du défilement de cette couronne (streamlining St , cf. article n°2 Cucchi *et al.* 2004). Les dimensions de la couronne sont utilisées pour estimer la surface frontale exposée au vent, en assimilant cette surface à une forme en diamant. Elles sont prédites par des relations empiriques espèce-dépendantes, utilisant comme variable indépendante le diamètre de l'arbre moyen et/ou sa hauteur (selon l'espèce). Pour une vitesse de vent comprise entre 10 et 25 m.s⁻¹, le streamlining n'évolue plus. Les ordres de grandeurs de d et de z_0 sont respectivement de 0.8 et 0.05 (comm. pers. B. Gardiner).

Les facteurs "lisière" ainsi que "rafale" sont dérivés des relations empiriques établies par Gardiner *et al.* (1997) pour des gammes de hauteurs d'arbre et d'espacements données. Ils impliquent tous les deux une augmentation de la charge du vent sur l'arbre, et donc une augmentation du moment de flexion maximal pour une même vitesse de vent. Le facteur "lisière" n'est supérieur à 1 que lorsqu'une nouvelle lisière est créée, dans ce cas le modèle demande en entrée la largeur de la trouée nouvellement créée. Le facteur "rafale" est dépendant de l'espacement et de la hauteur de l'arbre moyen ; il s'agit du rapport entre le moment de flexion maximal normalisé et le moment de flexion moyen normalisé, calculés de façon empirique à partir de l'espacement au sein du peuplement et de la hauteur de l'arbre moyen. Ils sont normalisés par le moment de flexion maximal mesuré en soufflerie à la lisière d'une maquette de forêt où les arbres sont espacés de 1.7 m.

Le facteur tenant compte du moment additionnel lié au déplacement du poids de l'arbre au delà de la verticale a une valeur de 1.22, c'est-à-dire que le moment dû au poids compte pour 22% du moment critique total (Gardiner *et al.* 2000). Cependant, le fonctionnement actuel du modèle prend en compte ce moment de façon plus élaborée, similaire à celle utilisée par le modèle de prédiction du risque HWIND (Peltola *et al.* 1999b, Gardiner *et al.* 2000) : le moment lié au poids est la somme des moments de chaque section de tronc de 1 m. Ces moments sont fonction de la charge appliquée par le vent, du poids et de la hauteur de chaque segment, du poids de la couronne et du module d'élasticité propre à l'espèce. Le poids des sections de tronc est estimé à l'aide du volume estimé et de la densité de bois vert. Le poids du houppier est estimé en utilisant les dimensions de la couronne (calcul de son volume) et la valeur de densité (en kg.m⁻³) fixée pour chaque espèce.

Le calcul empirique du moment critique de déracinement est explicité dans l'article n°2 (Cucchi *et al.* 2004), il utilise le poids de la tige en tant que variable indépendante. GALES

estime le poids de tige de l'arbre moyen en découpant la tige en 30 sections, selon le défilement présenté par Morgan et Cannell (1994). Ce modèle de défilement est utilisé quelque soit l'essence. Le modèle est composé de 2 parties, une prédisant le diamètre pour la partie de tige située sous le houppier, et une pour la partie située dans le houppier (Figure IV - 2). Un facteur correctif est calculé pour chacune des parties (C1 et C2) :

$$C1 = \frac{D_{basehouppier}}{L_{houppier}} \quad (IV-2)$$

avec $D_{basehouppier}$ le diamètre à la base du houppier et $L_{houppier}$ la longueur de houppier.

$$C2 = \frac{DBH}{\sqrt[3]{H - \left(\frac{L_{houppier}}{2}\right) - 1.30}} \quad (IV-3)$$

avec DBH le diamètre à 1.30 m, H la hauteur totale de l'arbre.

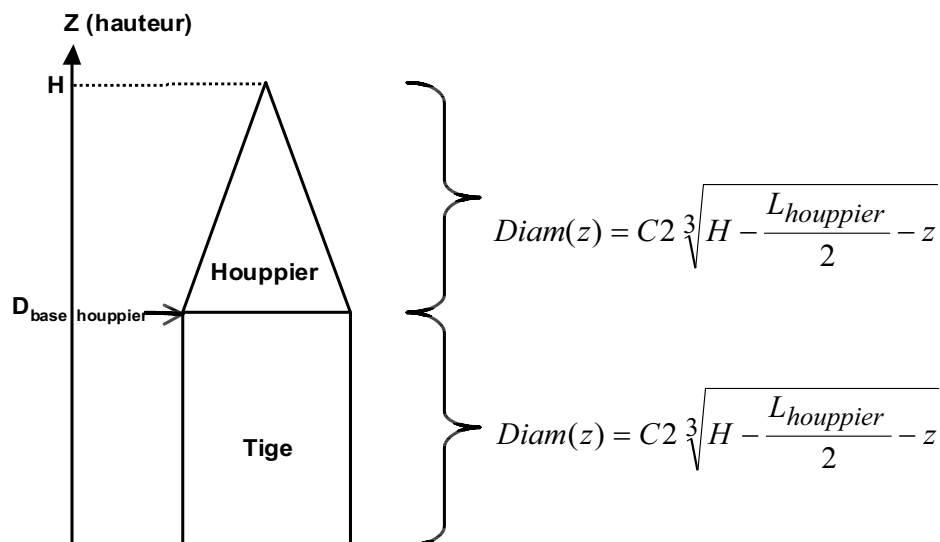


Figure IV - 2 : Schéma présentant la méthode de calcul de défilement utilisée par le modèle GALES.

Le poids de la tige est alors estimé en additionnant le poids des 30 sections de tige :

$$PoidsTige = \sum_{i=1}^n DensitéBoisVert \Pi \left[\frac{Diam(z)}{2} \right]^2 LongueurSection \quad (IV-4)$$

Le calcul du moment critique de casse est basé sur la résistance théorique de la tige en fonction du Module de Rupture (MOR) propre à l'espèce, du diamètre à 1.30 m et du facteur

nœud (présenté dans l'article), en supposant que le stress est uniforme le long de la tige (d'après Gardiner *et al.* (2000)) :

$$M_{crit,break} = \frac{\Pi}{32} f_{knot} MOR DBH^3 \quad (IV-5)$$

Les Moment critiques de déracinement et de casse ainsi obtenus sont comparés au moment maximal de flexion respectivement à 0 et 1.30 m. Ainsi on obtient le Moment de flexion appliqué par un vent de vitesse donnée à la base de l'arbre, et le Moment de flexion appliqué par un vent de vitesse donnée à 1.30 m.

Pour commencer les itérations, la vitesse de vent initiale appliquée à l'arbre est fixée à 64 m.s⁻¹. Puis, par itérations en diminuant ou en augmentant la vitesse, l'égalité entre Moment critique et Moment de flexion maximal est recherchée. Le processus s'arrête lorsque l'écart est inférieur à 0.1 m.s⁻¹. Ces itérations permettent donc d'obtenir la vitesse critique de casse et de déracinement à la hauteur *d*. Une correction est apportée à ces vitesses afin de la standardiser par rapport à la norme mondiale de hauteur de la mesure du vent (10 m au dessus du sol).

IV - 2.1.2 Phase 2 : prédiction des périodes de retour

Au cours de la seconde phase, GALES utilise un modèle décrivant le climat de vent pour une zone géographique donnée afin d'estimer la probabilité de retour (ou fréquence) des vitesses critiques. Le fonctionnement de ce modèle, le Detailed Aspect Method of Scoring (DAMS), est présenté dans l'introduction de cette thèse. Le logiciel ForestGALES permet au sylviculteur d'indiquer directement le DAMS de la zone où est localisé son peuplement s'il le connaît, ou de demander au modèle de le calculer en localisant son peuplement sur une carte de la Grande Bretagne. A partir de la valeur du DAMS, le modèle de Weibull estime les paramètres *A* et *k* qui décrivent la forme de la distribution de la probabilité de retour du vent en fonction de sa vitesse (Figure IV - 1). Le modèle calcule donc à partir de la distribution pour la zone donnée la probabilité de retour de chacune des vitesses critiques (Annual Exceedence Probability). La période de retour est l'inverse de cette probabilité, elle est exprimée en nombre d'années avant que n'arrive le dégât. Cette partie du modèle a été adaptée au Pin maritime en court-circuitant la partie DAMS, inadaptée en France, et en donnant au modèle directement en entrée les valeurs du *A* (3.6) et du *k* (1.55) indiquées dans l'Atlas des Vents d'Europe.

IV - 2.2 *L'utilisation du Module de Rupture sur pied des arbres testés en flexion pour l'estimation du facteur nœud*

Les valeurs du Module de Rupture bois vert sans défaut ainsi que du Module d'Elasticité ont été empruntées au Pin sylvestre pour l'adaptation du Pin maritime dans GALES. La valeur du facteur nœud a été conservée à 0.85, soit une diminution de 15% de la résistance de la tige à la casse en comparaison du bois vert sans défaut. Cependant, les données récoltées au cours des essais de flexion exposés dans le précédent chapitre ont permis, pour les individus cassés au cours de l'essai, d'estimer le module de rupture sur pied de chaque arbre. Pour cela, le diamètre sur écorce de la tige au point de rupture, dont la hauteur est mesurée sur le terrain, a été extrapolé par calcul géométrique en considérant le tronçon comportant la rupture comme un tronc de cône.

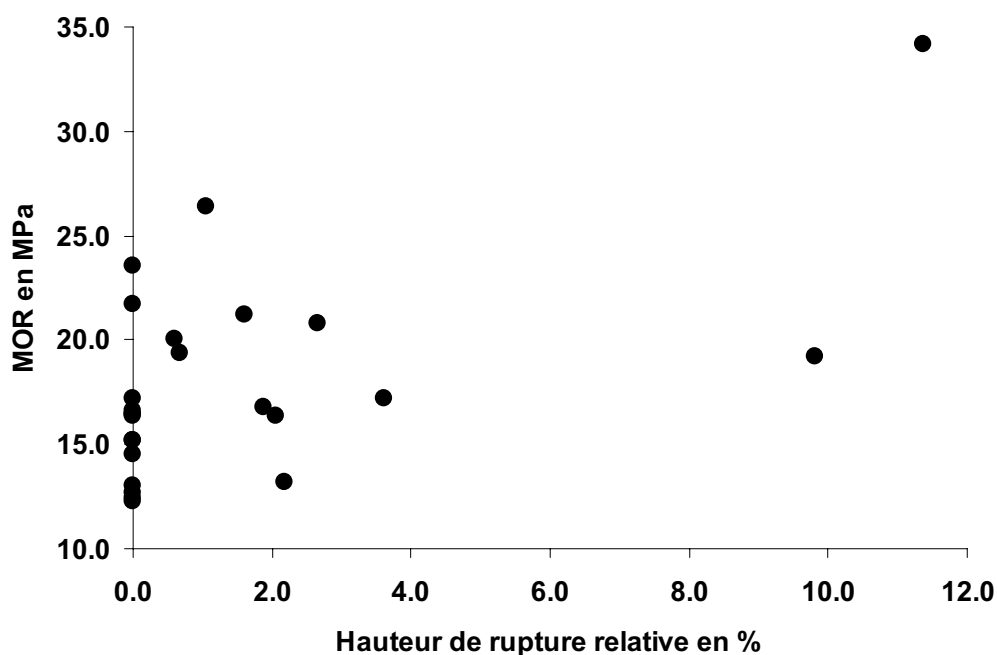


Figure IV - 3 : MOR en fonction de la hauteur relative de rupture sur le tronc

Le MOR apparaît comme étant très variable d'un individu à l'autre (Figure IV - 3). Sa valeur est sans relation avec la taille de l'arbre. La rupture a lieu principalement à la base de l'arbre, où le stress appliqué par la traction est maximal. La moyenne des MOR est de $17.9 \text{ MPa} \pm 4.9$, avec un minimum de 12.3 et un maximum de 34.2 MPa. Ces valeurs sont surestimées puisque calculées à partir d'un diamètre sur écorce. La "Timber Advisory Note" n°9 du Département Australien de l'Agriculture indique un MOR de bois vert sans défauts pour le Pin maritime de 36 MPa. Cette valeur est inférieure à la valeur utilisée actuellement,

empruntée au Pin sylvestre, et qui est de 46 MPa. De plus, ces résultats impliquent qu'en moyenne, le MOR sur pied pour cette essence est inférieur de 50% au MOR bois vert sans défauts. La valeur du facteur nœud pour le Pin maritime devrait donc être plus proche de 0.5 que de 0.85, comme c'est le cas actuellement.

IV - 2.3 Comparaison entre l'estimation du poids de tige par GALES et par PP3

Un meilleur ajustement de GALES pour le Pin maritime est possible à la fois par l'amélioration des valeurs des paramètres du modèle mais aussi par l'utilisation de modèles plus efficaces pour l'essence considérée que celles présentes dans GALES. L'estimation du poids de la tige influence à la fois l'estimation du moment critique de renversement, mais également celle du moment de flexion maximal. Or PP3 dispose de son propre modèle de défilement, mis au point par Najjar (1998) :

$$C = b C_{130} + (\alpha + \beta C_{130} + \gamma H) \left[(1 - hr^3) - b \left(1 - \left(\frac{1.30}{H} \right)^3 \right) \right] + \delta (1 - b) \quad (IV-6)$$

avec,

- C = circonférence à estimer, en cm,
- C_{130} = circonférence de l'arbre à 1.30 m, en cm,
- H = hauteur totale de l'arbre, en m,
- α , β , γ et δ sont des facteurs dont la valeur est respectivement de -13.964, 0.5996, 0.6281 et 2.668,
- $b = \frac{\log(hr)}{\log\left(\frac{1.30}{H}\right)}$,
- $hr = \frac{h}{H}$, avec h la hauteur sur le tronc correspondant à la circonférence C, en m.

Il est possible de comparer la prédiction du poids de tige pour le Pin maritime par GALES et par PP3. La figure IV - 4 présente un exemple de Pin maritime dont le profil de tige a été mesuré suite à un essai de flexion, puis estimé i) par l'équation de défilement de GALES (en rouge), et ii) l'équation de défilement élaborée par Najjar (1998) pour cette essence (en bleu).

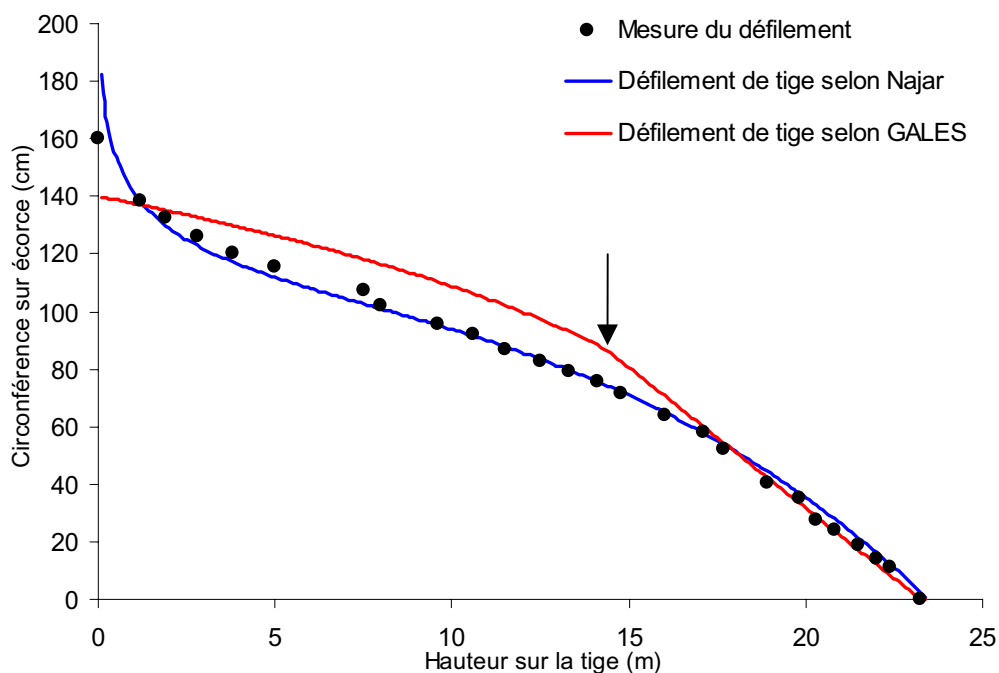


Figure IV - 4 : Défilement de tige mesuré et estimé pour un Pin maritime de 30 ans poussant en lande humide (sur alios), et situé au sein du peuplement. La flèche indique la hauteur de la première branche verte.

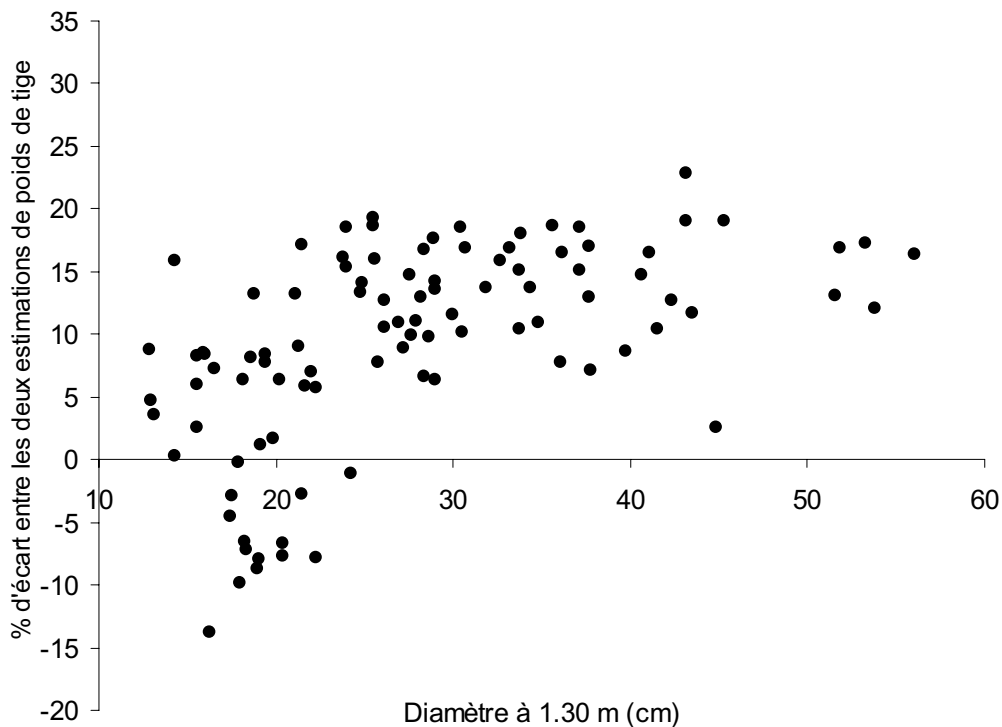


Figure IV - 5 : Différence d'estimation en % des poids de tige calculés à partir de l'équation de défilement utilisé dans GALES et de l'équation de défilement de Najjar (1988) en divisant la tige en 30 tronçons, pour chacun des 100 pins testés en flexion, en fonction de leur diamètre à 1.30 m.

Le modèle de défilement de tige selon Najjar est plus efficace que celui utilisé par GALES. Ce modèle ne pouvant résoudre $H = 0$ (le diamètre tend vers l'infini), il surestime le diamètre à la souche. La plus petite hauteur sur le tronc est de 0.65 m.

L'élaboration d'un programme de calcul sous SAS a permis le calcul du volume de tige estimé selon les deux méthodes de défilement. Pour cela, chaque tronçon de tige est considéré comme un tronc de cône. La figure IV - 5 représente l'écart en % entre l'estimation en utilisant le défilement selon Najjar, et celle en utilisant le défilement selon GALES.

Comme le montre le graphique, le défilement utilisé par GALES surestime le volume de tige. Cette surestimation atteint 15% au-delà de 25 cm de diamètre à 1.30 m, et peut aller jusqu'à plus de 20%.

IV - 2.4 Conclusion sur l'ajustement de GALES au Pin maritime et la réaction du modèle aux éclaircies

Les paramètres empruntés au Pin sylvestre dans l'implémentation actuelle du Pin maritime dans GALES pourront, à plus ou moins court terme, être aisément remplacés par les paramètres propres à l'essence qui nous intéresse. En revanche, l'utilisation de nouveaux modèles propres à améliorer la prédiction des vitesses critiques pour le Pin maritime, par exemple la prédiction du poids de la tige, demande un travail d'implémentation plus long.

La régression linéaire obtenue grâce aux données issues des essais de flexion permet au modèle de prédire le moment critique de renversement de l'arbre moyen du peuplement. Etant donné l'importance de la variabilité du nuage de points constatée, il nous faudrait étudier cette variabilité, pour la comprendre et identifier les facteurs en cause. Ceci nous permettrait ensuite de la réduire dans le modèle. Cette variabilité peut être différente entre peuplements, ou au sein d'un peuplement entre classes de taille, mais elle peut également résulter de notre échantillonnage. En effet, la méthode d'échantillonnage des arbres testés en flexion diffère de celle pratiquée par la Forestry Commission : sur certains peuplements, en raison de contraintes imposées par les propriétaires forestiers, seuls les pins prévus pour être éclaircis ont pu être testés. Dans ce cas, la plupart des pins testés étaient des arbres dominés. De façon générale sur l'ensemble de nos peuplements, nous avons donc testé en flexion des arbres de statut social variés par rapport à la Forestry Commission, qui effectue ses tests en flexion principalement sur des arbres dominants. Or, la forme de la tige via la longueur de la couronne (par exemple Muhairwe (1994)), et éventuellement la répartition des composantes de l'ancrage (Nielsen 2002), peuvent être différentes selon le statut social de l'arbre. Dans l'hypothèse d'un ancrage faisant intervenir des composantes différentes, ou

d'une réaction différente à l'arrachage en fonction de ce statut, le diamètre à 1.30 m, associé au poids de tige, ne serait pas une description suffisante des arbres puisque un arbre dominant sur un peuplement peut avoir le même DBH qu'un dominé sur un autre peuplement.

La réaction de GALES aux éclaircies pratiquées sur le peuplement ne correspond pas à ce que l'on aurait pu attendre : après une éclaircie, la vitesse critique pour les deux types de dégâts peut soit augmenter, soit diminuer. Dans la pratique, les éclaircies sont connues pour être un facteur de déstabilisation temporaire du peuplement (par exemple, Cremer *et al.* (1982), Rollinson (1988), Ruel (1995)). Lors d'une éclaircie, les valeurs de DBH et hauteur peuvent augmenter de façon technique. GALES calcule donc pour le même âge deux vitesses critiques par type de dégât. La réaction du modèle face à ces modifications techniques se fait en fonction de la relation entre l'augmentation de DBH ou de hauteur et l'augmentation de l'espacement. Or, si l'action de l'espacement est directement liée à la charge du vent, le DBH et la hauteur sont impliqués dans de nombreux calculs qui peuvent à la fois expliquer une diminution et une augmentation des vitesses critiques. Le modèle réagit à des changements de taille de peuplement et d'espacement, mais ne prend pas en compte le fait que les arbres ne sont pas adaptés à leur nouvel environnement.

Chapitre V

Conclusion générale, perspectives

Sommaire
- Chapitre V -
Conclusion générale, perspectives

V - 1	Conclusions sur la prédiction des vitesses critiques de vent pour le Pin maritime	89
V - 1.1	Cohérence des résultats obtenus à l'aide de la connexion CAPSIS-PP3/ForestGALES	89
V - 1.2	Améliorations proposées pour le Pin maritime dans GALES	90
V - 2	Éléments apportés à la compréhension de la stabilité au vent du Pin maritime	92
V - 3	Le passage au niveau "arbre"	94
V - 4	Prédire le risque, et effectuer des recommandations sylvicoles	96

V - 1 Conclusions sur la prédiction des vitesses critiques de vent pour le Pin maritime

V - 1.1 Cohérence des résultats obtenus à l'aide de la connexion CAPSIS-PP3/ForestGALES

Les vitesses de vent critiques de casse et de déracinement prédites pour des peuplements simulés de Pin maritime indiquent une augmentation de la sensibilité au vent avec l'âge du peuplement. Ce résultat est cohérent avec ceux de Ruel *et al.* (2000) et Moore et Quine (2000), qui emploient également GALES dans d'autres conditions (peuplements d'*Abies balsamea* au Québec, peuplements de *Picea sitchensis* et de *Pinus radiata* en Nouvelle-Zélande). De plus, il est en adéquation avec les observations relatives de façon générale dans la bibliographie. L'augmentation de l'indice de fertilité entraîne également une augmentation de la sensibilité du peuplement. Ces deux résultats sont directement liés à l'augmentation de la hauteur moyenne et dominante du peuplement. La hauteur des arbres et la sensibilité au vent sont fortement corrélées : avec la hauteur, la vitesse du vent augmente plus rapidement que la résistance de l'arbre, qui est liée au poids. L'effet des éclaircies n'a pas été étudié lors de ces travaux, et reste à explorer. Cependant ces éclaircies ont permis de modifier la densité de peuplement lors des simulations. Nos résultats montrent que les peuplements simulés les plus denses sont plus résistants au vent, de façon similaire aux travaux de Ruel *et al.* (2000) avec GALES sur *Abies balsamea*. La pénétration du vent est un facteur plus important à prendre en compte dans la résistance des peuplements de Pin maritime que le coefficient d'élanement de l'arbre moyen.

Bien que qu'il soit difficile de mettre en parallèle les sorties du modèle exprimées en vitesses de vent pour un arbre moyen et le pourcentage de dégâts de tempête, les prédictions obtenues et les observations des dégâts de la tempête de 1999 se rejoignent sur trois points :

- i) l'endommagement du peuplement augmente avec l'âge. Nous avons observé que le peuplement de 20 ans a subi moins de dégâts graves que celui de 50 ans,
- ii) l'endommagement principal est le déracinement,
- iii) l'endommagement diminue lorsque la densité augmente.

Sur ce dernier point, les observations de dégâts montrent un résultat plus nuancé que celui des simulations : toutes les placettes denses ont bien résisté, tandis que les dégâts sur les placettes peu denses sont très variables d'une placette à l'autre. Cette variabilité de dégâts est liée à la variabilité de réaction individuelle, alors qu'en forte densité, c'est la résistance

globale du peuplement qui est principalement mise en jeu. Ce type de résultat ne peut pas être obtenu avec GALES puisqu'il ne travaille que sur l'arbre moyen.

Les hypothèses émises pour expliquer ce taux de dégâts plus faible sur les placettes à forte densité ne sont pas toutes traduites dans GALES. Si le modèle tient bien compte de la plus faible pénétration du vent, induisant un plus faible moment de flexion, il ne prend pas en compte les facteurs de résistance supplémentaires pour des arbres en peuplement, tels que la dissipation d'énergie par contact entre houppier ou l'entrelacement des racines. Les vitesses critiques peuvent ainsi être sous-estimées, mais également surestimées, parce que les oscillations liées à la nature pulsatoire du vent entraînent une rupture progressive, et non instantanée, du système racinaire (O'Sullivan et Ritchie 1993), et impliquent une modification physique du sol autour de la plaque, par exemple lors du phénomène de fluidification de l'argile (Dupuy 2003).

Tester la fiabilité des modèles de prédiction du risque lié au vent à l'aide de données réelles reste pour le moment une réelle difficulté, puisque la vitesse du vent sur l'arbre reste inconnue lorsqu'on observe des dégâts. Un lien existe entre la vitesse moyenne modélisée par un profil de vent moyen appliqué au niveau de la canopée et les mesures de vitesses de vent standard réalisées en météorologie à 10 m au dessus du sol. En revanche, il faut faire un lien entre la vitesse moyenne modélisée et les vitesses de vent réellement subies par un pin lors d'une tempête. Il faudra considérer la hauteur à laquelle on compare ces vitesses, mais aussi la nature de ces données, vitesses moyennées sur une période donnée ou vitesses horaires maximales. Ceci est en partie pris en compte par le facteur "rafale" (Gust factor) de GALES, qui relie une vitesse moyenne générant un moment moyen de flexion et une vitesse maximale générant un moment de flexion maximal.

V - 1.2 Améliorations proposées pour le Pin maritime dans GALES

De nombreuses améliorations sont envisageables, elles peuvent être organisées en trois phases successives

La première phase consisterait à fournir à GALES les paramètres suivants pour le Pin maritime : MOR, facteur nœud, MOE. Pour obtenir un MOR comparable à ceux implémentés dans GALES pour les autres essences, des essais de rupture sur des éprouvettes de bois vert sans défauts, similaires à celles testées dans Lavers (1969), seraient nécessaires. Les MOR des arbres sur pied sont très variables, et beaucoup plus faibles en moyenne que le MOR théorique de bois vert sans défaut indiqué dans la bibliographie. Une valeur plus proche de 0.5 que de 0.85 serait plus indiquée pour le Pin maritime. En diminuant le facteur

nœud, la vitesse critique nécessaire à la casse diminuerait. Les prédictions de casse de tige seraient plus fréquentes que celles obtenues actuellement lors des simulations, notamment lorsque l'aliol est absent. Ceci correspondrait mieux aux dégâts de 1999 observés dans le Médoc, et aux résultats des essais de flexion en lande sèche, où la casse était fréquente. Le MOE d'arbres sur pied pourrait être estimé en reproduisant la méthode employée par Peltola *et al.* (2000), c'est-à-dire en utilisant des jauges de déformation placées sur le tronc au début d'un essai de flexion : les auteurs ont constaté une grande différence entre le MOE mesuré sur bois vert sans défauts et le MOE des arbres testés sur pied.

La seconde phase d'amélioration serait de fournir directement à GALES toutes les informations relatives aux caractéristiques dendrométriques du peuplement. En particulier, PP3 pourrait directement donner en entrée la valeur du poids de la tige, qui permet la prédiction du moment critique de renversement, et donc de la vitesse critique de déracinement. Nos résultats montrent que le modèle utilisé dans GALES surestime de 15% ce poids de tige pour des arbres de gros diamètre. Cependant, cette variable indépendante pourrait être changée puisque les résultats des essais de flexion indiquent que la variable ($H \times DBH^2$) explique mieux la variabilité du moment critique de renversement que le poids de la tige pour le Pin maritime.

En utilisant les données issues des essais de flexion, nous avons calibré un modèle de hauteur de première branche verte, puis nous l'avons implémenté dans GALES. Procéder à l'inverse, c'est-à-dire utiliser PP3, permettrait de mieux prédire les dimensions et le poids du houppier. Mieux prédire ces variables revient à mieux calculer le moment de flexion, particulièrement dans le cas d'espacements plus importants que ceux définis dans nos simulations, et où la prise au vent jouerait plus.

La variabilité est un aspect important de la résistance au vent du Pin maritime. **La troisième phase** impliquerait de tester la sensibilité de GALES par rapport à la variabilité des paramètres espèce-dépendants du modèle, et plus particulièrement le paramètre C_{reg} . Les simulations font apparaître que les variations du C_{reg} selon la présence d'aliol ou non induisent des différences de vitesses critiques de déracinement significatives. Ce paramètre est expliqué en grande partie par le poids de la tige. Y-a-t'il d'autres variables qui pourraient réduire la variabilité? Les essais de flexion et les résultats obtenus sur la taille relative des racines superficielles au vent laissent supposer que la morphologie du système racinaire peut expliquer une part de cette variabilité. Si tel est le cas, comment mettre en évidence ce paramètre, et s'il n'est pas facilement mesurable pour des arbres sur pied, comment le prédire à partir d'une variable accessible à la mesure?

D'autre part, un niveau de complexité plus important peut être envisagé pour le modèle. GALES suppose que le stress appliqué par la courbure est uniforme le long de la tige, et la casse est en théorie proche de 1.30 m. Les observations de dégâts et les essais de flexion ont montré que la casse a rarement lieu à cette hauteur. Elle est souvent plus basse (pour les tests en flexion, à cause d'un stress important à la base de l'arbre), mais surtout elle est souvent plus haute sur les arbres cassés observés après la tempête. Le modèle FOREOLE (Ancelin *et al.*, soumis pour publication dans *Forest Ecology and Management*), modèle mécaniste de prédiction des vitesses critiques de vent, basé sur les mêmes principes que GALES et HWIND, prend en compte le stress le long de la tige en utilisant les matrices de transfert. Les simulations montrent que, pour 70% des arbres, le stress en compression est maximal à une hauteur supérieure à 50% de la hauteur totale de l'arbre.

Des modèles d'ancrage empiriques tels qu'utilisés dans HWIND (Peltola et Kellomaki 1993, Peltola 1996, Peltola *et al.* 1997, Peltola *et al.* 1999b, Peltola *et al.* 2000) peuvent permettre d'estimer la résistance de l'arbre en fonction des caractéristiques du peuplement, notamment sa densité : le modèle d'ancrage présent dans HWIND utilise les variables du peuplement pour prédire les dimensions du système racinaire, dont il déduit sa résistance.

Envisager ces modifications profondes du modèle doit tout d'abord nous faire considérer l'importance du gain que peuvent apporter ces améliorations par rapport à la complexité qu'elles induisent dans le modèle.

V - 2 Éléments apportés à la compréhension de la stabilité au vent du Pin maritime

Ce travail de thèse a apporté de nombreux éléments sur la stabilité du pin maritime en peuplement et sa mécanique d'ancrage, en s'appuyant sur trois approches complémentaires s'alimentant mutuellement. Cette démarche a permis à la fois de recueillir des données d'observation de dégâts précieuses pour la validation de modèles futurs et l'alimentation de bases de données, d'expérimenter des tests d'ancrage pour la première fois sur des Pins maritime adultes en peuplement, et enfin d'obtenir pour le Pin maritime un modèle de prédiction des vitesses critiques nous permettant de comparer la sensibilité au vent de peuplements virtuels soumis à divers scénarios sylvicoles.

Contrairement à ce qui était attendu, nous n'avons pas mis en évidence d'effet de la présence de l'alius sur la résistance à l'arrachage, et donc pas pu confirmer l'hypothèse selon laquelle profondeur et qualité de l'ancrage sont liées. La mesure de la présence d'alius n'était pas indépendante puisque réalisée à partir de l'observation des plaques racinaires. De plus, ces observations étaient difficiles à effectuer sur les pins les plus petits. Ces

expérimentations nous ont permis de tirer des enseignements concernant le protocole des essais de flexion. A l'avenir, il sera judicieux de déterminer la contrainte physique représentée par l'aliost sur la croissance verticale des racines en effectuant au préalable des tests pédologiques, par exemple en utilisant un résistographe, comme cela fut suggéré par nos collègues du CDGA.

En comparant les moments critiques de renversement des pins selon leur exposition aux vents dominants, il apparaît que les pins de lisière sont 20% plus résistants au renversement que les pins situés au sein du peuplement. Aucune différence n'a été trouvée entre pins internes et pins de lisière concernant la longueur relative de houppier, la courbure basale, ou d'autres paramètres des parties aériennes mesurés. En revanche, la plaque racinaire côté au vent des arbres de lisière est 30% plus étendue par rapport aux arbres internes. L'expérimentation *in situ* de l'ancrage racinaire a permis de confirmer l'hypothèse de départ d'une meilleure résistance des arbres en lisière de peuplement. On suppose que ceci est dû à la fois à la taille plus importante de la plaque racinaire, liée à l'absence de compétition, et à l'adaptation de l'arbre aux sollicitations mécaniques du vent. Des expérimentations pourraient être nécessaires pour dissocier les deux effets, par exemple en étudiant les différences architecturales au niveau racinaire, ou la résistance à la traction des racines des arbres de lisière par rapport aux internes.

La morphologie des systèmes racinaires de Pin maritime observés dans les conditions de sol extrêmes rencontrées dans les Landes de Gascogne (aliost à 60 cm ou sans aliost) nous laisse penser que c'est essentiellement le sol qui influence cette architecture, avant même l'essence (Quine *et al.* 1995). Des études supplémentaires d'ancrage sur des zones plus contrastées en terme de présence de l'aliost pourraient être menées, afin de compléter les données actuelles.

Au niveau peuplement, les observations de dégât et la modélisation ont montré que la sylviculture, essentiellement par le contrôle de la densité, joue un rôle important dans la sensibilité au vent. Au travers de la densité, c'est l'espacement qui est le facteur fondamental, parce qu'il est lié à la pénétration du vent dans le peuplement, et par ce qu'il met en évidence l'importance du soutien mutuel des arbres dans les peuplements. Ce soutien mutuel améliore la tenue au vent des peuplements facilement sujets au déracinement à cause des conditions locales du sol. Ce soutien mutuel a été évoqué au niveau aérien dans la bibliographie et lors des observations de dégâts réalisées, mais il est peu connu au niveau racinaire. Quelle est l'importance de l'entrelacement des racines dans l'augmentation de la résistance des arbres en peuplement? La partie racinaire d'un peuplement à un instant t est expliquée par son histoire, à la fois au travers de la croissance,

mais aussi des systèmes racinaires laissés en place après une éclaircie, tandis que la partie aérienne est enlevée du peuplement.

V - 3 Le passage au niveau "arbre"

Les prédictions des vitesses critiques sont réalisées à l'échelle du peuplement. La variabilité mise en évidence lors de ce travail peut nous amener à penser qu'une prédiction des vitesses critiques au niveau de l'arbre pourrait améliorer la qualité des prédictions. Néanmoins, il faut d'abord considérer la faisabilité et la cohérence de ce changement d'échelle par rapport au modèle actuel, puisque ce passage au niveau arbre sous-entendrait d'utiliser un même outil pour deux niveaux où les facteurs de résistance sont différents. De plus, quels en seraient les avantages et les inconvénients?

Tout d'abord, passer au niveau arbre pourra permettre du point de vue scientifique une meilleure compréhension des facteurs de stabilité les plus pertinents pour le Pin maritime, en obtenant des simulations à un niveau inférieur. Le modèle de croissance PP3 est capable de fournir les caractéristiques dendrométriques de chacun des arbres d'un peuplement simulé. On pourra alors obtenir une gamme de vitesses de vent pour le peuplement étudié, en appliquant le profil de vent moyen calculé à l'échelle du peuplement sur chacun des arbres, mais sans réellement considérer l'ensemble des facteurs qui influencent la résistance d'un arbre au sein d'un peuplement. En particulier, GALES utilise l'espacement moyen entre les arbres, déduit de la densité de peuplement. Un espacement variable au sein du peuplement ne peut pas être pris en compte. Ainsi un nouveau calcul des vitesses critiques sur chaque arbre en tenant compte des caractéristiques dendrométriques individuelles mais sans tenir compte de la variabilité de l'espacement pourrait constituer une première étape vers l'échelle individuelle. Tenir compte des caractéristiques individuelles permettra de corroborer nos résultats sur l'influence du statut social de l'arbre. Les observations réalisées sur les dégâts de tempête ont montré que les arbres à couronne plus courte sont plus sujets au bris de tige. Outre les caractéristiques dendrométriques classiques, il faudrait s'intéresser à d'autres variables. Le MOE des pins dominés peut être plus important que celui des dominants, et la rigidité de tige peut être plus variable entre dominants/dominés d'un même peuplement qu'entre peuplements (Brüchert *et al.* 2000). Avant de passer au niveau arbre, il est donc indispensable d'étudier cette variabilité, afin de comprendre les facteurs qui en sont responsables. De plus, la variabilité doit être exploitée non seulement au niveau des caractéristiques de l'arbre mais aussi du sol, en utilisant les résultats trouvés sur le pourcentage de présence de l'alien au niveau du peuplement. On attribuerait selon le

pourcentage de recouvrement de l'altius le critère "avec altius" ou "sans altius" à chacun des arbres du peuplement, critère qui renverrait au modèle d'ancrage correspondant.

Le passage au niveau arbre nécessiterait de prendre en compte les différences d'ancrage démontrées dans cette étude entre les pins poussant en lisière de peuplement et les pins situés au sein du peuplement. Le modèle considère en partie l'adaptation des arbres de lisière puisque les arbres placés sur une lisière établie de longue date et les arbres au sein du peuplement sont considérés comme ayant la même résistance pour un vent de vitesse donnée. Cependant, l'étude d'ancrage montre que les arbres de lisière ne sont pas seulement de résistance équivalente aux arbres internes, mais de résistance supérieure. Néanmoins, la considération des lisières se heurte à plusieurs problèmes. La définition d'une lisière est différente entre les modèles aérodynamiques de GALEX, qui considèrent un arbre comme interne au delà de 5 à 10 fois la hauteur de l'arbre moyen, et les modèles de croissance, qui s'appuient sur des placettes dont la lisière représente au moins une fois la hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne. De plus, la croissance pour ce type d'arbre est mal connue, et de surcroît non modélisée pour le Pin maritime. Des études sont donc nécessaires pour mieux comprendre le fonctionnement de ces arbres en lisière.

Enfin, dans une optique de validation des modèles de prédiction des vitesses critiques, le passage à un niveau "arbre" pourrait permettre de comparer les dégâts réels observés sur des peuplements de caractéristiques connues et ceux prédits par le modèle, en imaginant une sortie du modèle en terme de pourcentage de dégâts (déracinement et casse) sur le peuplement. Ce pourcentage de dégât est obtenu pour une vitesse critique ou une gamme de vitesses critiques données, qui pourraient être comparées aux vitesses maximales horaires moyennées sur l'année, enregistrées par la station météorologique la plus proche des sites. Cette comparaison permettrait d'exploiter pleinement les données recueillies lors de la première étude, et notamment celles disponibles sur le dispositif de Saint Alban.

Le passage à une échelle plus fine est-il intéressant pour le sylviculteur, dans une optique d'aide à la gestion du risque? Au niveau peuplement, la version actuelle du modèle permet l'obtention d'une valeur de vitesse critique pour l'ensemble du peuplement représenté par l'arbre moyen. Au delà de cette vitesse, le propriétaire doit considérer son peuplement comme ruiné. Etant donné l'homogénéité relative en taille des arbres constituant un peuplement de Pin maritime issu de plantation, l'intérêt du passage au niveau arbre pour le sylviculteur pourrait être limité. Il peut être intéressant dans le cas de peuplements inéquiennes, afin de voir quelles classes de taille sont les plus vulnérables, comme le montrent Ancelin *et al.* (soumis pour publication dans *Forest Ecology and Management*). En travaillant au niveau arbre sur des peuplements hétérogènes en taille de *Picea abies*, le modèle FOREOLE montre une forte déconnexion entre volume et nombre d'arbre touchés,

ce qui a un fort intérêt pour le sylviculteur. En revanche, le type de dégât arbre par arbre peut être intéressant à prédire : la casse ou le déracinement, ainsi que la hauteur de casse, ne signifient pas la même chose en terme de récupération du bois abattu.

V - 4 Prédire le risque, et effectuer des recommandations sylvicoles

Le modèle actuel prédit des vitesses critiques de vent pour un peuplement de Pin maritime de caractéristiques données. Néanmoins, il ne s'agit pas encore de prédiction du risque. Pour cela, il faudrait franchir le pas entre vitesses et périodes de retour, ou probabilités de dégâts, pour une zone géographique donnée, tel que réalisé dans ForestGALES. Cette étape nécessite l'apport de données météorologiques afin d'obtenir par le modèle de Weibull les paramètres de la distribution des vitesses de vent moyennes en fonction de leur fréquence pour la zone géographique qui nous intéresse, ou au moins de faire la relation entre période de retour et vitesse de vent, telle que dans Moore et Quine (2000). Prédire le risque nécessite à la fois l'estimation de la probabilité d'occurrence de l'événement considéré, de l'exposition du peuplement en terme d'intensité, de fréquence et de durée, mais également l'estimation de l'amplitude de la réponse du peuplement à cet événement, donc de sa sensibilité, et des dégâts attendus.

Pour élaborer des recommandations sylvicoles, un outil quantitatif tel que GALES est nécessaire. De plus, il faut situer ces recommandations par rapport au cycle de vie du peuplement : est-on au début d'une révolution, au milieu, à la fin? La gestion du risque ne s'envisage pas de la même façon selon le moment auquel on se situe au cours de la révolution. La prise en compte du risque dans la gestion forestière peut se faire par exemple en diminuant les longueurs de révolution, ou en éclaircissant tôt, comme indiqué par Cameron (2002). Mais cette prise en compte du risque lié au vent doit également être reliée aux facteurs économiques, afin de juger de la balance des coûts entre le gain des actions sylvicoles pour une prise en compte du risque et le coût engendré. De plus, ce coût peut augmenter lorsque les recommandations entrent en conflit avec la qualité du bois, par exemple lors de plantations initiales espacées, tel que le remarquent Brüchert *et al.* (2000), Gardiner et Quine (2000) et Cameron (2002). La difficulté est donc de lier gestion du risque et nécessité de production.

Enfin, la prise en compte de la gestion des peuplements contigus au peuplement étudié est un facteur important de la prédiction du risque à un niveau d'étude plus global. Pour les peuplements de Pin maritime dans les Landes de Gascogne, un facteur favorisant les dégâts

dus au vent est la coupe rase et le remplacement des peuplements forestiers par des cultures agricoles de type maïsiculture. Ces modifications d'environnement déstabilisent fortement les peuplements adjacents encore en place. Meilby *et al.* (2001) incorporent cet aspect de protection dans un modèle de prédiction du risque, directement dans l'évaluation des divers scénarios de gestion. La forme de la parcelle sur la force d'attaque du vent a également une influence sur la sensibilité du peuplement. Cet aspect peut être intégré en utilisant un Système d'Information Géographique. Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans le cadre d'une prédiction du risque à l'échelle du massif.

Bibliographie

- AFOCEL, 1994.** Manuel de sylviculture du Pin maritime. AFOCEL, Paris, 145 pp.
- Ancelin P., Courbaud B., Fourcaud T.** Predicting partial wind damage in a population of trees using an individual based mechanical model. Accepté pour publication dans *Forest Ecology and Management*.
- Barker J. E., 1978.** Some silvicultural effects of fertilisation. *New Zealand Journal of Forestry Science* 8 (1), 160-177.
- Becquey J., Riou-Nivert P., 1987.** L'existence de "zones de stabilité" des peuplements, conséquences sur la gestion. *Revue Forestière Française* 39, 323-334.
- Bellone N., 1989.** L'art de reconstruire les forêts. *Science et Vie* 864, 44-53.
- Bennie A.T.P., 2002.** Growth and mechanical impedance. Dans : Waisel Y *et al.* (éditeurs), *Plant roots : the hidden half*, 3^{ème} édition. Marcel Dekker Inc., New York, pp 453-469.
- Bingham I.J., Bengough A.G., 2003.** Morphological plasticity of wheat and barley roots in response to spatial variation in soil strength. *Plant and Soil* 250, 273-282.
- Birot Y., Gollier C., 2001.** Risk assessment, management and sharing in forestry, with special emphasis on wind storms. 14^{ème} *Convocation of Academies of Engineering and Technological Sciences*, Espoo, Finland.
- Blackburn P., Petty J.A., Miller K.F., 1988.** An assessment of the static and dynamic factors involved in windthrow. *Forestry* 61, 29-43.
- Blackwell P.G., Rennolls K., Coutts M.P., 1990.** A root anchorage model for shallowly rooted Sitka spruce. *Forestry* 63, 73-91.
- Bouchon J., 1987.** Etat de la recherche relative aux dégâts forestiers dus aux tempêtes. *Revue Forestière Française* 39, 301-312.
- Brüchert F., Becker G., Speck T., 2000.** The mechanics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst): mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* 135, 45-62.
- Caldwell M.M., 1987.** Competition between root systems in natural communities. Dans : Gregory P.J. *et al.* (éditeurs), *Root development and function*. Cambridge University Press, London, pp 167-185.
- Cameron A.D., 2002.** Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry* 75, 25-35.
- Collectif INRA-CEMAGREF, 2000.** Dégâts des tempêtes aux forêts : facteurs de sensibilité ou de résistance. *La Forêt Privée* 255, 17-54.
- Coutts M.P., 1983.** Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 71, 171-188
- Coutts M.P., 1986.** Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* 59, 173-197.

- Cremer K.W., Borough C.J., McKinnell F.H., Carter P.R., 1982.** Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 12, 244-268.
- Cucchi V., Bert D., 2003.** Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. *Annals of Forest Science* 60 (3), 209-226.
- Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., Bert D., Berthier S., de Coligny F., Courbaud B., Denis A., Lastennet R., Najar M., 2003.** CapForêt. Prédiction de la résistance mécanique de l'arbre au vent : développement d'un système d'expertise destiné aux forestiers par le couplage CAPSIS/FORESTGALES. Convention n°2002.09 / B04156 Gip Ecofor/INRA, rapport final janvier 2004, 50 pp. + annexes.
- Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., Berthier S., Bert D., Najar M., Denis A., Lastennet R., 2004.** Root anchorage of inner and edge trees in stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. *Trees - Structure and Function* 18 (4), 460-466.
- Day W., 1950.** Soil conditions which determine windthrow in forests. *Forestry* 23, 90-95.
- Doll D., 1988.** Les cataclysmes météorologiques en forêt. Thèse de doctorat de l'Université Lumière Lyon II, Lyon, 158 pp.
- Dreveton C., 2002.** L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950-1999. *La Météorologie* 8 (37), 46-56.
- Dunham R.A., Cameron A.D., 2000.** Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce. *Forest Ecology and Management* 135, 73-81.
- Dupuy L., 2003.** Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I, Bordeaux, 132 pp.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., 2003.** A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science*, sous presse.
- Dupuy M.P., 1987.** Essais de prospection électromagnétique radar en mines et au sol - Interprétation et traitement des données. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I, Bordeaux, 131 pp.
- England A.H., Baker C.J., Saunderson S.E.T., 2000.** A dynamic analysis of windthrow of trees. *Forestry* 73, 225-237.
- Ennos A.R., 1993.** The scaling of root anchorage. *Journal of Theoretical Biology* 161, 61-75.
- Faure A., Pellet J., 1984.** Détermination des efforts exercés par le vent sur un arbre. *Agronomie* 4, 83-90
- Fayle D.C.F., 1975.** Distribution of radial growth during the development of Red Pine root systems. *Canadian Journal of Forest Research* 5, 608-625.

- Finnigan J.J., Brunet Y., 1995.** Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeur), *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 3-40.
- Fourcaud T., 1999.** Défauts de forme et structure interne du Pin maritime. 4^{ème} Colloque De la forêt cultivée à l'industrie de demain - propriétés et usages du Pin maritime, ARBORA, Bordeaux, pp 77-84.
- Fraser A.I., 1962.** The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35, 117-127.
- Fraser A.I., Gardiner J.B.H., 1967.** Rooting and stability in Sitka spruce. Forestry Commission Bulletin 40, Forestry Commission, Edinburgh
- Fredericksen T.S., Hedden R.L., Williams S.A., 1993.** Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 1760-1765.
- Fridman J., Valinger E., 1998.** Modelling probability of snow and wind damage using tree, stand, and site characteristics from *Pinus sylvestris* sample plots. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13, 348-356.
- Galinski W., 1989.** A windthrow-risk estimation for coniferous trees. *Forestry* 62, 139-146.
- Gardiner B.A., Peltola H., Kellomaki S., 2000.** Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling* 129, 1-23.
- Gardiner B.A., Quine C.P., 2000.** Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management* 135, 261-277.
- Gardiner B.A., Stacey G.R., Belcher R.E., Wood C.J., 1997.** Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70, 233-252.
- Gersani M., Sachs T., 1992.** Development correlations between roots in heterogeneous environments. *Plant, Cell and Environment* 15, 463-469.
- Groome J.S., 1988.** Mutual support of trees. *Scottish Forestry* 42, 12-14.
- Harrington C.A., DeBell D.S., 1996.** Above- and below-ground characteristics associated with wind toppling in a young *Populus* plantation. *Trees - Structure and Function* 11, 109-118.
- Hedden R.L., Fredericksen T.S., Williams S.A., 1995.** Modeling the effect of crown shedding and streamlining on the survival of loblolly pine exposed to acute wind. *Canadian Journal of Forest Research* 25, 704-712.
- Hirvela H., Hynynen J. 1990.** Effect of fertilization on the growth, top damage and susceptibility to windthrow of Scots pine stands in Lapland. *Folia Forestalia* 764, 16 pp.
- Inglis D.W.F., Choularton T.W., Stromberg I.M.F., Gardiner B.A., Hill M., 1995.** Testing of a linear airflow model for flow over complex terrain and subject to stable, structured

- classification. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeurs), *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 88-112.
- Jacamon M., 2001.** Guide de dendrologie. Arbres, arbustes, arbrisseaux des forêts françaises. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Nancy, 348 pp.
- Jalkanen A., Mattila U., 2000.** Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the national forest inventory data. *Forest Ecology and Management* 135, 315-330.
- Kerzenmacher T., Gardiner B.A., 1998.** A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind. *Trees - Structure and Function* 12, 385-394.
- Kettunen L., Mukula J., Pohjonen V., Rantanen O., Varjo U., 1988.** The effect of climatic variations on agriculture in Finland. Dans : Parry M.L. *et al.* (éditeurs), *The impact of climatic variations on agriculture, volume 1: assessments in cool temperate and cold region*. Kluwer Academic Publishers, Dordrechts, pp 511-614.
- Kozlowski T.T., Pallardy S.G., 1997.** Physiology of woody plants, 2^{ème} édition. Academic Press, San Diego, California, 641 pp.
- Krasowski M., Hawkins C., Coates H., Ott P., 1996.** Static tests of lodgepole pine stability in the central interior of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 26, 1463-1472.
- Kulla T., Lohmus K., 1999.** Influence of cultivation method on root grafting in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Plant and Soil* 217, 91-100.
- Laiho O., 1987.** Susceptibility of forest stands to windthrow in southern Finland. *Folia Forestalia* 706, 24 pp.
- Lavers G.M., 1969.** The strength properties of timbers. Forestry Production Research Laboratory Bulletin 50, 2^{ème} édition, HMSO, London.
- Lefrou G., 1979.** Résultats, après dix ans d'expérimentation, de deux essais de fertilisation de regonflage sur pin maritime dépérissant dans les Landes de Gascogne. *Revue Forestière Française* 31 (2), 226-234.
- Lekes V., Dandul I., 2000.** Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). *Forest Ecology and Management* 135, 331-344.
- Lemoine B., 1980.** Densité de peuplement, concurrence et coopération chez le Pin maritime. II. - Résultats à 5 et 10 pour une plantation à espacement variable. *Annales des Sciences Forestières* 37, 217-237.
- Lindstrom A., Rune G., 1999.** Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. *Plant and Soil* 217, 29-37.

- Lohmander P., Helles F., 1987.** Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2, 227-238.
- Maugé J.-P., 1987.** Le pin maritime. Institut pour le Développement Forestier, Paris, 192 pp.
- Mayhead G.J., 1973.** Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology* 12, 123-130.
- Meilby H., Strange N., Thorsen B.J., 2001.** Optimal spatial harvest planning under risk of windthrow. *Forest Ecology and Management* 149, 15-31.
- Meunier S., Ruel J.C., Laflamme G., Achim A., 2002.** Résistance comparée de l'épinette blanche et du sapin baumier au renversement. *Canadian Journal of Forest Research* 32, 642-652.
- Miller K.F., 1985.** Windthrow Hazard Classification. Leaflet 85, Forestry Commission, HMSO, London.
- Milne R., 1991.** Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology* 9, 383-399.
- Mitchell S.J., 2000.** Stem growth responses in Douglas-fir and Sitka spruce following thinning: implications for assessing wind-firmness. *Forest Ecology and Management* 135, 105-114.
- Mitchell S.J., Hailemariam T., Kulis Y., 2001.** Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. *Forest Ecology and Management* 154, 117-130.
- Moore J.R., 2000.** Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *Forest Ecology and Management* 135, 63-71.
- Moore J.R., Maguire D.A., 2004.** Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees - Structure and Function* 18, 195-203.
- Moore J.R., Quine C.P., 2000.** A comparison of the relative risk of wind damage to planted forests in Border Forest Park, Great Britain, and the Central North Island, New Zealand. *Forest Ecology and Management* 135, 345-353.
- Morgan J., Cannell M.G.R., 1994.** Shape of tree stems - a re-examination of the uniform stress hypothesis. *Tree Physiology* 14, 49-62.
- Muhairwe C.K., 1994.** Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 1904-1913.
- Myers C.A., 1963.** Vertical distribution of annual increment in thinned Ponderosa pine. *Forest Science* 9, 394-404.
- Najar M., 1998.** Modèle de croissance et qualité pour le Pin maritime, tranche 1. Rapport final de la 1^{ière} tranche, convention DERF-INRA-AFOCEL, 9 pp.

- Najar M., 2002.** Sylviculture et résistance au vent des peuplements de Pin maritime. Conventions n° 2000 Gip Ecofor /AFOCEL et n°2000F4541 Conseil Régional-CPFA, rapport final novembre 2002, 80 pp.
- Neild S.A., Wood C.J., 1999.** Estimating stem and root-anchorage flexibility in trees. *Tree Physiology* 19, 141-151.
- Ni Dhubhain A., Walshe J., Bulfin M., Keane M., Mills P., 2001.** The initial development of a windthrow risk model for Sitka spruce in Ireland. *Forestry* 74, 161-170.
- Nicoll B.C., Easton E.P., Milner A.D., Walker C., Coutts M.P., 1995.** Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeurs), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 276-292.
- Nicoll B.C., Ray D., 1996.** Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology* 16, 891-898.
- Nielsen C.C.N., 1995.** Recommendations for stabilisation of Norway spruce stands based on ecological surveys. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeurs), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 424-435.
- Nielsen C.C.N., 2002.** Adaptive physiology and tree management. Source électronique www.kursus.kvl.dk/aptm, accédé le 3 novembre 2003.
- Oliver H.R., Mayhead G.J., 1974.** Wind measurements in a Pine forest during a destructive gale. *Forestry* 47, 185-194.
- O'Sullivan M.F., Ritchie R.M., 1993.** Tree stability in relation to cyclic loading. *Forestry* 66, 69-82.
- Papesch A.J.G., Moore J.R., Hawke A.E., 1997.** Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *New Zealand Journal of Forestry Science* 27, 188-204.
- Pardé J., Bouchon J., 1988.** Dendrométrie, volume 2. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Nancy, 328 pp.
- Peltola H., 1996.** Model computations on wind flow and turning moment by wind for Scots pines along the margins of clear-cut areas. *Forest Ecology and Management* 83, 203-215.
- Peltola H., Kellomaki S., 1993.** A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27, 99-111.
- Peltola H., Kellomaki S., Hassinen A., Granander M., 2000.** Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135, 143-153.
- Peltola H., Kellomaki S., Vaisanen H., 1999a.** Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. *Climatic Change* 41, 17-36.

- Peltola H., Kellomaki S., Vaisanen H., Ikonen V.P., 1999b.** A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian Journal of Forest Research* 29, 647-661.
- Peltola H., Nykanen M.L., Kellomaki S., 1997.** Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and birch sp. at stand edge. *Forest Ecology and Management* 95, 229-241.
- Petty J.A., Swain C., 1985.** Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry* 58, 75-84.
- Petty J.A., Worrell R., 1981.** Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry* 54, 115-128.
- Putz F.E., Coley P.D., Lu K., Montalvo A., Aiello A., 1983.** Uprooting and snapping of trees: structural determinants and ecological consequences. *Canadian Journal of Forest Research* 13, 1011-1020.
- Quine C.P., 1995.** Assessing the risk of wind damage to forest : practice and pitfalls. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeurs), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 379-403.
- Quine C.P., 2000.** Estimation of mean wind climate and probability of strong winds for wind risk assessment. *Forestry* 73, 247-258.
- Quine C.P., Coutts M., Gardiner B.A., Pyatt G., 1995.** Forest and wind: management to minimise damage. Forestry Commission Bulletin 114, HMSO, London.
- Ray D., Nicoll B.C., 1998.** The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71, 169-182.
- Riou-Nivert P., 2001.** Les résineux. Tome 1, Connaissance et reconnaissance, 2^{ème} édition. Institut pour le Développement Forestier, Paris, 256 pp.
- Rollinson T.J.D., 1988.** Thinning control. Forestry Commission Field Book 2, HMSO, London.
- Rouvinen S., Kuuluvainen T., 1997.** Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 890-902.
- Ruel J.-C., 1995.** Understanding windthrow: silvicultural implications. *Forestry Chronicle* 71, 434-445.
- Ruel J.-C., Pin D., Spacek L., Cooper K., Benoit R., 1997.** The estimation of wind exposure for windthrow hazard rating: comparison between Stronblow, MC2, Topex and a wind tunnel study. *Forestry* 70, 253-256.
- Ruel J.C., Quine C.P., Meunier S., Suarez J., 2000.** Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGales model. *Forestry Chronicle* 76, 329-337.

- Rune G., Warensjo M., 2002.** Basal sweep and compression wood in young Scots pine trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17, 529-537.
- Saunderson S.E.T., England A.H., Baker C.J., 1999.** A dynamic model of the behaviour of sitka spruce in high winds. *Journal of Theoretical Biology* 200, 249-259.
- Savill P.S., 1983.** Silviculture in a windy climate. *Forestry Abstracts* 44, 473-488.
- Skatter S., Kucera B., 2000.** Tree breakage from torsional wind loading due to crown asymmetry. *Forest Ecology and Management* 135, 97-103.
- Smith V.G., Watts M., James D.F., 1987.** Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 17, 1080-1091.
- Solantie R., 1986.** Effect of weather and climatological background on snow damage of forests in Southern Finland in November 1991. *Silva Fennica* 28, 203-211.
- Somerville A., 1979.** Root anchorage and root morphology of *Pinus radiata* on a range of ripping treatments. *Zealand Journal of Forestry Science* 9, 294-315.
- Somerville A., 1980.** Wind stability: forest layout and silviculture. *New Zealand Journal of Forestry Science* 10, 476-501.
- Stacey G.R., Belcher R.E., Wood C.J., Gardiner B.A., 1994.** Wind flows and forces in a model spruce forest. *Boundary-Layer Meteorology* 69, 311-334.
- State of the World's Forests (SOFO), 1999.** Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome,
- State of the World's Forests (SOFO), 2003.** Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome, 151 pp.
- Stokes A., 1999.** Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant and Soil* 217, 17-27
- Stokes A., Berthier S., Sacriste S., Martin F., 1998.** Variations in maturation strains and root shape in root systems of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Trees - Structure and Function* 12, 334-339.
- Stokes A., Drexhage M., Guitard D., 2000.** A method for describing the possible site of failure in trees during mechanical loading. Dans : Stokes A. (éditeur), *The supporting roots of trees and woody plants: form, function and physiology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 279-285.
- Stokes A., Fitter A.H., Coutts M.P., 1995.** Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. *Journal of Experimental Botany* 46, 1139-1146.
- Stokes A., Nicoll B.C., Coutts M.P., Fitter A.H., 1997.** Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effects on biomass allocation, root development, and resistance to bending. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 1049-1057.

- Stokes A., Salin F., Dupuy L., Cucchi V., 2004.** Que savons-nous de la biomécanique racinaire? *Forêt-Entreprise* 156, 23-27.
- Sundström E., Keane M., 1999.** Root architecture, early development and basal sweep in containerized and bare-rooted Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Plant and Soil* 217, 65-78.
- Tardieu F., 1994.** Growth and functioning of roots and root system subjected to soil compactation. Toward a system with multiple signalling? *Soil and Tillage Research* 30, 217-343.
- Telewski F.W., 1995.** Wind-induced physiological and developmental responses in trees. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeurs), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 237-263.
- Telewski F.W., Jaffe M.J., 1981.** Thigmomorphogenesis: changes in the morphology and chemical composition induced by mechanical perturbation in 6-month-old *Pinus taeda* seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 11, 380-387.
- Ulanova N.G., 2000.** The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review. *Forest Ecology and Management* 135, 155-167.
- Urban S.T., Lieffers V.J., Macdonald S.E., 1994.** Release in radial growth in the trunk and structural roots of white spruce as measured by dendrochronology. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 1550-1556.
- Valinger E., Fridman J., 1997.** Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *Forest Ecology and Management* 97, 215-222.
- Valinger E., Fridman J., 1999.** Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce and birch forests in Sweden. *Environmental Management* 24, 209-217.
- Valinger E., Lundqvist L., Brandel G., 1994.** Wind and snow damage in a thinning and fertilisation experiment in *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9, 129-134.
- Wilson J.S., Oliver C.D., 2000.** Stability and density management in Douglas-fir plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 30, 910-920.
- Wolf A., Moller P.F., Bradshaw R.H.W., Bigler J., 2004.** Storm damage and long-term mortality in semi-natural, temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management* 188, 197-210.
- Wood C.J., 1995.** Understanding wind forces on trees. Dans : Coutts M.P., Grace J. (éditeurs), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 133-164.
- Wu T.H., Omer R.M., Erb R.T., Beal P.E., 1988.** Study of Soil-Root Interaction. *Journal of Geotechnical Engineering* 114, 1351-1375.
- Zhu J., Matsuzaki T., Sakioka K., 2000.** Wind speeds within a single crown of Japanese black pine (*Pinus thunbergii* Parl.). *Forest Ecology and Management* 135, 19-31.

Annexes

Ces annexes contiennent des actes de communication et des posters présentés à l'occasion de colloques ou de séminaires, ainsi qu'un article publié dans le numéro 156 de "Forêt - Entreprise".

Comportement mécanique de l'ancrage de *Pinus pinaster* Ait. sur différents types de sols et d'exposition dans les Landes de Gascogne.

Cucchi V.*, Meredieu C., Stokes A.

INRA URF, UMR LRBB, Site Forêt-Bois, 69 Rte d'Arcachon, 33612 CESTAS Cedex – France ; * cucchi@pierreton.inra.fr

Introduction

Cette étude a pour but de caractériser le comportement mécanique de l'ancrage racinaire du Pin maritime dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne. Les deux principales stations testées sont la lande humide et la lande sèche : cette distinction est relative à la présence plus ou moins marquée d'un horizon d'aliols induré qui stoppe la croissance verticale des racines et influence donc la qualité de l'ancrage. De plus, le système racinaire du Pin maritime s'adaptant aux sollicitations mécaniques induites par le vent (Stokes *et al.* 1998), des individus en situation protégée au sein du peuplement et des individus exposés aux vents dominants d'Ouest/Nord-Ouest peuvent présenter une résistance d'ancrage différente.

Matériel et Méthodes

Pour définir ce comportement, 82 pins au sein du peuplement ou en lisière Ouest, répartis sur quatre peuplements de lande humide et deux peuplements de lande sèche, ont été testés en flexion statique à l'aide d'un tire-fort, jusqu'à la ruine (chablis ou volis). Des données dendrométriques combinées à la force de traction déployée pour arracher l'arbre permettent de calculer le moment critique de renversement M_{CR} . Ces expérimentations permettent de comparer le comportement mécanique des arbres selon le type de sol ou leur exposition au vent.

Deux inclinomètres sont placés sur le tronc de l'arbre testé, l'un au niveau d'attache du câble de traction, l'autre au niveau du sol ; la force de traction est mesurée à l'aide d'un capteur de force. Ces données d'inclinaison et de force enregistrées toutes les secondes au cours de l'essai nous permettent de traduire le comportement mécanique de l'arbre. La figure 1 montre l'évolution de la force de traction et des inclinaisons au cours du temps.

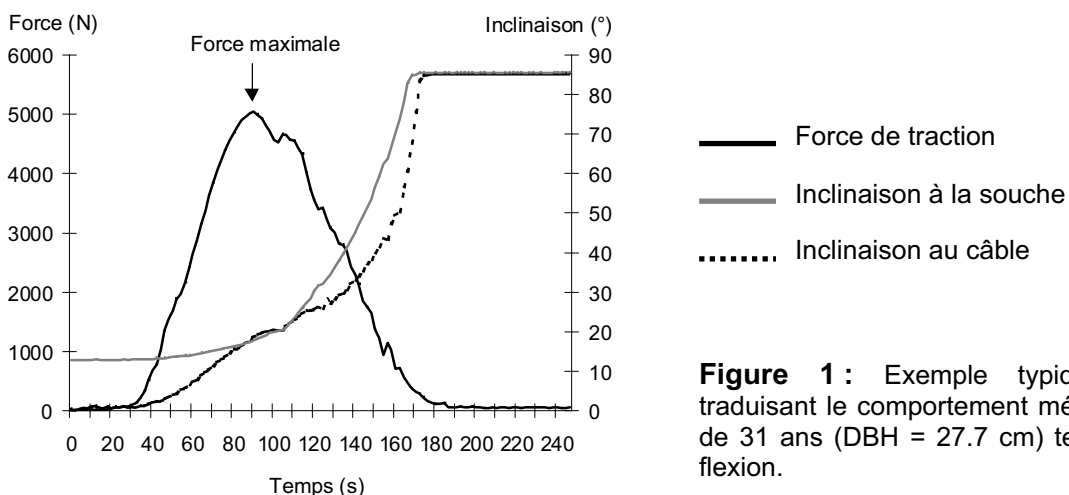


Figure 1 : Exemple typique de courbe traduisant le comportement mécanique d'un pin de 31 ans (DBH = 27.7 cm) testé par essai de flexion.

Si on exprime ce comportement d'ancrage par le moment total de renversement de l'arbre selon l'angle d'inclinaison à la base de l'arbre alors la tangente à la courbe au début de l'essai exprime la rigidité de l'ancrage racinaire (comm. pers. T. Fourcaud). Sur la figure 1, le point maximal de force utilisé pour le calcul du moment critique de renversement de l'arbre est indiqué.

Résultats

On cherche à relier ce moment critique de renversement M_{CR} avec une caractéristique dendrométrique de l'arbre. Les coefficients de Pearson montrent une corrélation hautement significative ($p < 0.001$) entre le M_{CR} et les variables [Poids de tige], $[DBH^3]$ (DBH : diamètre à 1.30m) et $[H \times DBH^2]$ (H : hauteur totale du pin). Elles expliquent toutes séparément 94% de la variabilité du M_{CR} . La variable que nous utiliserons est le $[H \times DBH^2]$ (figure 2) car elle est issue de valeurs directes mesurées sur le terrain.

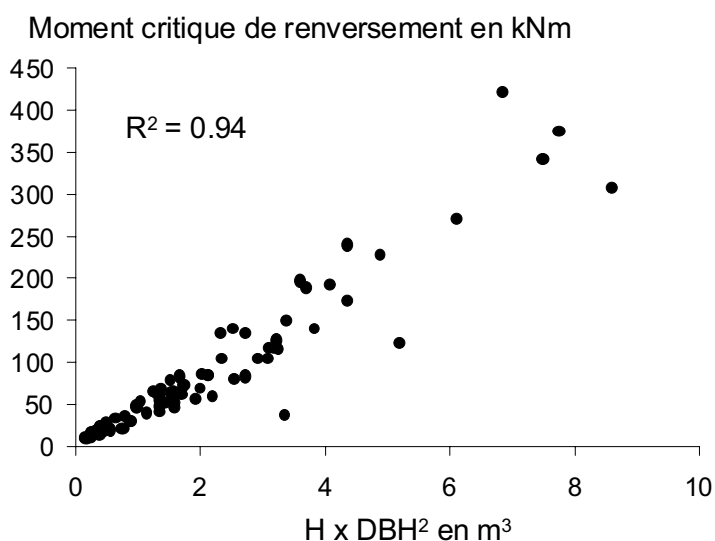


Figure 2 : Relation entre le M_{CR} et la variable $[H \times DBH^2]$.

Cette régression est alors utilisée pour comparer le comportement mécanique du Pin maritime selon le type de sol et l'exposition aux vents dominants (pins internes ou de lisière). L'analyse de covariance effectuée sur les régressions pondérées indique qu'en lande humide, le $[H \times DBH^2]$ a un effet hautement significatif sur le M_{CR} ($p < 0.001$), et l'interaction « exposition x covariable » est significative au seuil de 5% ($p = 0.04$), les pentes sont donc significativement différentes. En lande sèche, le $[H \times DBH^2]$ a un effet hautement significatif sur M_{CR} ($p < 0.001$) mais l'effet « exposition » ne l'est pas au seuil de 5% ($p = 0.50$) (R^2 pins internes et de lisière = 0.75). Cet effet « exposition » n'apparaît donc qu'en lande humide (pins internes, $R^2 = 0.86$; pins de lisière, $R^2 = 0.93$). L'analyse de covariance ne montre aucune différence significative entre les pins de lande sèche et de lande humide quelle que soit leur exposition. En conclusion, les pins de lisière en lande humide ont une meilleure résistance à l'arrachage que les pins internes.

D'autre part, des différences morphologiques entre les quatre groupes de pins « lande x exposition » ont également été prospectées (Tableau I).

Tableau I Caractéristiques allométriques souterraines des pins testés en flexion selon le type de lande et d'exposition.

Un nombre positif pour l'asymétrie horizontale et verticale de la plaque racinaire correspond à un centre de gravité décalé respectivement vers le Sud et vers l'Est. Les moyennes présentant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (Analyse de Variance). L'interaction « lande x exposition » n'était jamais significative.

Variable	Lande humide				Lande sèche			
	Pins internes		Pins de lisière		Pins internes		Pins de lisière	
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
Asymétrie verticale de la plaque racinaire (%)	+ 7.7 a	7.7	+19.1 b	5.9	+ 4.5 a	9.6	+ 22.7 b	2.3
Asymétrie horizontale de la plaque racinaire (%)	+ 0.8 a	6.5	- 6.3 a	12.6	- 1.7 a	5.9	0.7 a	10.6
Profondeur d'enracinement/DBH	2.52 a	0.63	2.35 a	0.78	2.74 a	0.73	2.07 a	0.59
Somme des sections de racines latérales/Surface de la plaque racinaire	0.31 a	0.26	0.16 a	0.11	0.31 a	0.23	0.23 a	0.14
Teneur en eau du sol (%)	10.4 a	4.6	10.5 a	3.3	6.5 b	2.0	4.8 b	1.4

Discussion

La méthodologie employée est classiquement utilisée dans les études de résistance mécanique des arbres (Fraser 1962; Somerville 1979; Coutts 1986; Smith *et al.* 1987; Fredericksen *et al.* 1993; Papesch *et al.* 1997; Ray et Nicoll 1998; Moore 2000; Peltola *et al.* 2000; Meunier *et al.* 2002) mais les connaissances déjà existantes sur le comportement mécanique du Pin maritime (Stokes et Guitard 1997; Stokes 1999) nous ont amenés à l'améliorer en ajoutant un capteur de déplacement près du point de rotation (à la base de l'arbre, au plus près de la souche). Nous avons complété l'échantillon des arbres à l'intérieur des peuplements avec des arbres de lisière plus exposés aux vents dominants.

Le M_{CR} est corrélé avec la taille de l'arbre et notamment le poids de la tige ou l'expression de son volume (Fraser 1962; Somerville 1979; Papesch *et al.* 1997; Gardiner *et al.* 2000; Meunier *et al.* 2002). En utilisant $[H \times DBH^2]$, on s'affranchit d'erreurs d'estimation induites par un calcul du poids de la tige ; d'autre part, on utilise des paramètres directement mesurables, classiquement employés en foresterie dans la caractérisation d'un arbre.

En lande humide, les arbres de lisières sont plus résistants que les arbres internes. Ceci semble en partie lié à l'extension et à l'architecture (taille et nombre) des racines traçantes côté au vent. Cette extension est directement liée à l'absence de compétition inter-arbre dans une direction donnée d'une part car l'extension de plaque est directement liée à la densité de population (Cucchi

et Bert 2003), et d'autre part l'adaptation du système racinaire du Pin maritime est constatée dans la direction des vents dominants (Stokes *et al.* 1998). Cette différence de résistance arbres de lisière/arbres internes n'apparaît pas en lande sèche, peut-être en partie en raison d'une plus forte variabilité des M_{CR} . Cette variabilité de résistance est sans doute due à l'hétérogénéité du sol induite par un alios discontinu (comm. pers. A. Denis). Ceci est confirmé par une plus grande gamme d'épaisseur de plaque racinaire. Le plus faible échantillonnage d'arbres de lisière peut également expliquer l'absence de différences de comportement. De la même façon, on ne note pas de différence significative de résistance entre les pins de lande humide et de lande sèche. Ceci serait dû à une profondeur d'enracinement similaire alors que l'on aurait pu s'attendre à des enracinements plus profonds en lande sèche.

La présence de pivot ou la profondeur d'enracinement, équivalant ici à l'épaisseur de la plaque racinaire, ne sont pas en relation avec la résistance à l'arrachage chez les individus âgés, contrairement à (Fraser 1962) sur *Picea sitchensis* et *Pseudotsuga taxifolia*. L'exemple de courbe de comportement (figure 1) typique de nos arbres échantillon montre un point maximal de force atteint rapidement au cours de l'essai, alors que l'angle d'inclinaison de l'arbre est encore faible. Ceci est particulièrement vrai chez les arbres âgés. A cet instant critique, le moment dû au poids de l'arbre participe en moyenne à 9% du M_{CR} , résultat similaire à (Papesch *et al.* 1997) pour *Pinus radiata*. On peut supposer que ce M_{CR} obtenu correspond en grande partie à la résistance des racines traçantes côté au vent, contrairement à ce que constate (Mickovski et Ennos 2002). En effet, dans notre cas, la limitation de l'ancrage en profondeur est telle que les racines traçantes peuvent jouer un rôle principal dans l'ancrage de l'arbre. L'ensemble de ces résultats appuie donc l'hypothèse d'une résistance de l'ancrage reposant surtout sur la partie superficielle de la plaque.

Actuellement sont en cours des mesures de tractions sur les racines traçantes récoltées sur les arbres arrachés. Cette étude devrait permettre de vérifier les différences de résistance entre les facteurs testés.

Ce travail est inclus dans un projet de prédiction des risques liés au vent suite à la tempête de 1999 qui a sévèrement touché le massif des Landes de Gascogne. Les résultats de cette étude permettront d'ajouter le Pin maritime au modèle et au logiciel ForestGALES (Cucchi *et al.* 2003).

Références :

- Coutts MP (1986)** Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* 59: 173-197.
- Cucchi V, Bert D (2003)** Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. *Annals of Forest Science* (in press).
- Cucchi V, Meredieu C, Stokes A, Bert D, Berthier S, Coligny de F, Courbaud B, Denis A, Lastennet R, Najar M (2003)** CapForêt. Prédiction de la résistance mécanique de l'arbre au vent : développement d'un système d'expertise destiné aux forestiers par le couplage CAPSIS/FORESTGALES. Rapport intermédiaire. Convention n° 2002.09 / B04156 Gip Ecofor/INRA, 18p. + annexes.
- Fraser AI (1962)** The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35: 117-127.
- Fredericksen TS, Hedden RL, Williams SA (1993)** Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1760-1765.
- Gardiner BA, Peltola H, Kellomaki S (2000)** Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling* 129: 1-23.
- Meunier S, Ruel JC, Laflamme G, Achim A (2002)** Résistance comparée de l'épinette blanche et du sapin baumier au renversement. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 642-652.
- Mickovski SB, Ennos AR (2002)** A morphological and mechanical study of the root systems of suppressed crown Scots pine *Pinus sylvestris*. *Trees-Structure & Function* 16: 274-280.
- Moore JR (2000)** Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *Forest Ecology & Management* 135: 63-71.
- Papesch AJG, Moore JR, Hawke AE (1997)** Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *New Zealand Journal of Forestry Science* 27: 188-204.
- Peltola H, Kellomaki S, Hassinen A, Granander M (2000)** Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology & Management* 135: 143-153.
- Ray D, Nicoll BC (1998)** The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71: 169-182.
- Smith VG, Watts M, James DF (1987)** Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1080-1091.
- Somerville A (1979)** Root anchorage and root morphology of *Pinus radiata* on a range of ripping treatments. *New Zealand Journal of Forestry Science* 9: 294-315.
- Stokes A (1999)** Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant & Soil* 217: 17-27.
- Stokes A and Guitard D (1997)** Tree root response to mechanical stress. In *Biology of root formation and development*, Altman A and Waisel Y (ed.), Plenum Publishing, New York, pp 227-236.
- Stokes A, Berthier S, Sacriste S, Martin F (1998)** Variations in maturation strains and root shape in root systems of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Trees-Structure & Function* 12: 334-339.

Root anchorage of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different soil conditions.

Cucchi, V.¹, Stokes, A.¹, Meredieu, C.¹, Berthier, S.¹⁻², Najjar, M.³, Bert, D.¹

¹INRA URF – UMR LRBB, 69, route d'Arcachon 33 612 Cestas Gazinet, France.

cucchi@pierreton.inra.fr

²Forestry Commission Research Agency, Scotland, U.K.

³AFOCEL Sud-Ouest, France.

Abstract

Static winching tests were carried out in order to determine the mechanical resistance of Maritime pine to overturning. The selected stands were chosen over a wide range of ages and tree sizes, and grouped into two sets based on their typical soil conditions; wet Lande, characterised by the presence of a hardened iron pan horizon with a shallow ground-water table in winter, and dry Lande, where the iron pan can be absent or broken up and a deeper ground-water table. The iron pan horizon limits the vertical growth of tree roots.

The critical turning moment at the base of the stem was found to be positively related to $[H \times DBH^2]$ ($r^2 = 0.96$), stem weight ($r^2 = 0.95$), cube of diameter at breast height $[DBH^3]$ ($r^2 = 0.94$) and certain root characteristics e.g. soil-root plate depth and volume.

Linear regression analyses between critical bending moment and $[H \times DBH^2]$, with regards to soil conditions, showed no significant differences between uprooting resistance for the trees growing on wet Lande compared to the dry Lande. However, allometric characteristics showed that trees on wet Lande have significantly a greater relative crown length and basal swept than those growing on dry Lande.

Modulus of rupture (MOR) calculated on trees broken during winching was 46% lower than the values obtained on green wood found in the literature. MOR does not differ significantly between dry Lande and wet Lande, but the results were highly variable.

These data on the mechanical behaviour of Maritime pine anchorage for conditions in Southwest France will allow the development of allometric relations in models which will be used to adapt ForestGALES: a wind risk assessment model developed by the Forestry Commission. ForestGALES predicts the return times of high winds able to overturn or break the average tree of a stand. The adapted model will constitute an expert system to estimate wind risks according to the dendrometric evolution of the stand.

Introduction

Monospecific stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) cover about 800.000 ha in the Aquitaine region, Southwest France, and are thus of great economic importance. This cultivation produces 16% of the national pulp and wood, even though it only covers 7% of forested land in France. In December 1999, the most violent hurricanes known since the establishment of this cultivated forest occurred. Wind devastated the northernmost part of the range and caused estimated losses of 26.1 million m³ of wood, i.e. 19% of standing volume and 3.5 years of harvest (IFN, communication from the updated 4th Gironde and Landes inventory).

This study aims to characterise the resistance of root anchorage for Maritime pine growing in the two main soil conditions found in the Landes region. Anchorage strength of trees has been characterised by several authors using a static tree-pulling method (Fraser 1962,

Somerville 1979, Coutts 1986, Smith et al 1987, Fredericksen et al 1993, Papesch et al 1997, Ray and Nicoll 1998, Moore 2000, Peltola et al 2000, Meunier et al 2002). This method allows comparisons between species due to their different mechanical behaviour (Savill 1983, Peltola et al 2000). This behaviour could be explained by stem characteristics e.g. taper (Meunier et al 2002) or root system architecture and anchorage strength (Stokes 1999). From these static tests, the critical turning moment is calculated for each tree. Numerous authors have found a linear relationship between the critical turning moment and a variable of tree size e.g. stem weight (Fraser 1962, Somerville 1979, Papesch et al 1997, Gardiner et al 2000, Meunier et al 2002).

Soil type and conditions play an important role in tree anchorage (Fraser 1962, Stone and Kalisz 1991, Ray and Nicoll 1998), and yet have received relatively little attention in the past. In the Landes region, soil is a sandy podzol, and sites are classified into two types: in « wet Lande », vertical growth of tree roots is limited by a shallow ground-water table or by a hardened iron pan horizon at a depth of 0.5 – 1.0 m (Jolivet et al 1997, Trichet et al 1997). This horizon, formed by winter water logging, is fairly regular, and results in the formation of poorly anchored, shallow root-systems. In « dry Lande », the iron pan horizon is absent or broken up because of a deeper ground-water table. Consequently, tree root systems are able to penetrate deeper in the soil, thereby improving anchorage. Most damage resulting from the 1999 storm was due to the uprooting of trees, rather than from stem breakage.

By carrying out winching tests on a wide range of Maritime pine trees, this study investigated the following three points:

- which is the most effective relationship for predicting the critical turning moment for Maritime pine?
- using this relationship, do differences exist concerning the mechanical resistance of anchorage according to Lande type?
- can the allometric comparison of trees between the two Lande types can be linked to the critical turning moment?

Material and Methods

The « Landes de Gascogne » region is located in the Southwest of France. This region is flat. Mean annual precipitation is 930 mm, occurring mainly in the winter and spring months (Porté et al 2000). Prevailing winds are from the west to northwest with a mean wind-speed of 3.3 m.s^{-1} (Stokes 1999).

In order to determine the mechanical behaviour of Maritime pine at different ages and in different soil conditions, the experiments were carried out at several sites in this region. Six stands were sampled and classified according to the predominant understorey species (*Molinia caerulea* for wet Lande, *Calluna sp.* for dry Lande) : four in wet Lande and two in dry Lande. These stands were chosen with tree age and size varying from stand to stand (Table 1).

In each stand, trees were selected to represent all the Diameter at Breast Height classes (DBH) in the stand. As it was difficult to take into account the flexuosity of Maritime pine stems, with regards to tree mechanical behaviour, only straight and leaning trees were chosen for this study. When leaning trees were selected, it was ensured that they leaned in the direction of the prevailing wind (SE). Trees were also single-stemmed with no apparent stem defects.

The winching system was similar to that used by Coutts 1986, Papesch et al 1997, Stokes 1999, Moore 2000, Peltola et al 2000, Meunier et al 2002. A motorised winch (Tirefor type Hit-Trac 16) was used with a 16 kN maximal strength capacity. For the larger trees a pulley was also used which doubled the winch capacity, and occasionally a 320 kN maximal strength capacity hand winch was utilised. The winch was attached to the base of an anchoring tree at the longest possible distance to the winched tree, in order to obtain a small angle θ between ground level and the cable. The nominal height of the cable attachment was 10 – 50% of the tree height, varying from tree to tree. This height was usually lower than a

third – half of tree height (Moore 2000, Peltola et al 2000) and always lower than 80% height in order to maintain a uniform stress profile in the outer fibres (Wood 1995).

Table 1: Characteristics of each stand used in the study

Study site	Lande	Stand establishment	Tree age (years)	Number of tree/ha	Mean DBH (cm)	Mean height (m)
Eperville	Wet	Sown in bands	31	94	35.3	20.8
D. France	Wet	Planted	15	1133	17.6	11.3
Callen	Dry	Natural regeneration	50	127	38.7	25.2
Cameleyre	Wet	Sown in bands	49	383	39.7	23.2
Coyole	Dry	Natural regeneration	47	260	36.2	21.4
Luë	Wet	Sown in bands	29	427	25.8	18.8

Table 3: Number and characteristics of winched trees. Means are \pm standard error

Study site	Winched	Uprooted	Broken	Date of winching	Mean DBH	Mean height
Eperville	6	5	1	6-8/03/02	38.4 \pm 6.0	20.9 \pm 1.3
D. France	11	9	2	29/03-9/04/02	18.1 \pm 2.9	11.3 \pm 1.2
Callen	14	10	4	12-18/04/02	41.0 \pm 8.0	25.3 \pm 1.4
Cameleyre	6	6	0	20-23/01/03	34.1 \pm 7.2	21.4 \pm 1.6
Coyole	7	6	1	23-28/01/03	26.7 \pm 3.8	19.6 \pm 2.1
Luë	11	10	1	10-12/03/03	26.1 \pm 2.6	18.8 \pm 1.5

Table 2: Measurements on the tested trees

On standing trees	Total height, of the first living branch	cm
	Girth at 1.30m, and at the stem base	mm
	Stem lean from the vertical at 0m and 1.50 m; Azimuth of lean	cm, °
On winched trees	Tree total length, to the first living branch, and to the cable point attachment	cm
	Stem girth every 1 m intervals	mm
	Distance from the stump to each whorl which must have at least one living branch	cm
	Basal diameter of each living branch	mm
	Crown area (see Fig. 1)	cm ²
	Total mass of all living branches (= crown biomass)*	kg
	Dimensions and mass of a one meter long section of trunk (= green wood density)*	kg.m ⁻³
	On broken trees	Height between the stem base and the failure	cm
Length of the broken part of the stem		cm
On soil-root plate of uprooted trees	Length of the four radii	cm
	Depth	cm
	Diameter of lateral roots on the windward edge	mm

* Measurements on at least 30% of the total number winched trees

The attachment height also had to be low enough in the stem to induce root failure instead of stem breakage. The tension applied to the winched tree was measured by a load cell attached between the winch and the anchoring tree, and recorded every second using a data logger type Almemo 2290-8 V5. Three different load cells used for experiments (Scaime type K25H – 50 kN, K25H – 20 kN and M11 – 50 kN) depending on the size of the tree, and which measured loads of up to 20 or 50 kN. In order to determine deflection angle α of the tree during the winching test, two inclinometers were tied to the tree, one at the cable attachment point, and the other at the base of the stem. The latter allowed soil-root plate rotation to be taken into account. Measurements of angle were recorded every second with a second identical data logger, synchronised and simultaneously activated with the load cell data logger. The distance between the test tree and anchoring point, as well as the cable height were measured. The compass direction of winching was also noted. Measurements on trees were taken before and after winching the tree sideways until failure (Table 2).

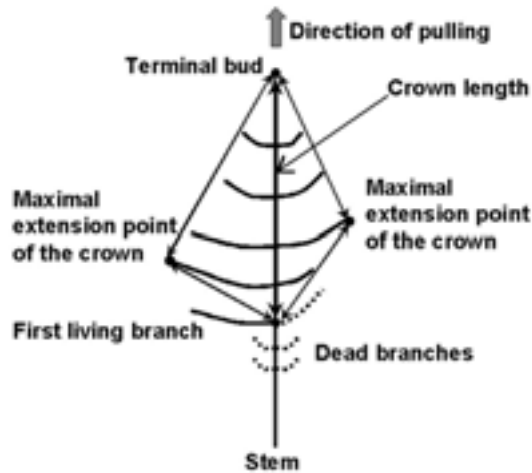


Fig. 1: Measurements of crown dimensions on winched trees. The crown area was calculated with trigonometric relationships using crown length and lengths of the quadrilateral's sides.

56 trees were pulled sideways until failure (Table 3), 35 in wet Lande and 21 in dry Lande. Tree winching was carried out during the winter and spring months, when the soil moisture was greatest. After each tree was winched over, several samples of soil between 150 and 200 cm³ were removed from around and underneath the soil-root plate, in order to measure soil humidity. Each sample was immediately weighed, and then over dried at 105°C until a constant mass was reached. Dry mass was then measured and %weight loss calculated.

The force needed to cause failure of a tree was extracted from the recorded load data, associated with deflection values at the rupture time. The critical bending moment applied at the stem base was calculated according to Young 1972:

$$TM_{crit,applied} = F_x \times H_{cable} + F_y \times \sin \alpha \times H_{cable}$$

where F_x is the horizontal component and F_y the vertical component of the maximal applied force F (N), H_{cable} is the cable attachment height (= the lever arm, m) and α the deflection angle of the lever arm when the force is maximal. This angle is obtained from the values given by the inclinometers. F_x and F_y are deduced from the value of F (N) and the cable angle θ , which was derived from the distance between the tree winched and the anchoring tree distance, and the cable attachment height:

$$F_x = F \times \cos \theta \text{ and } F_y = F \times \sin \theta$$

The total critical turning moment $TM_{crit,total}$ at the stem base adds the critical bending moment applied by the winch to the critical turning moment $TM_{crit,weight}$ due to the force resulting from the overhanging weight of the leaning tree during winching. The weight of the winch and cable were neglected. Crown mass was measured or estimated by a relationship with DBH calibrated for each stand. Stem mass was estimated with the sum mass of one meter stem sections. Stem section mass was deduced from the green wood density measured for the tree or calculated for the stand. The stem section was assumed to be a truncated cone form. The Modulus of Rupture of the trees which failed in the stem was calculated (Petty and Worrell 1981) with the same hypothesis of stress in the outer fibres as Morgan and Cannell 1994. As the moment was applied at the height of failure, the cable attachment height is reduced by subtracting this height to compensate for the critical turning moment.

Using REG and GLM procedures of SAS software (SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA), we performed Pearson correlations between $TM_{crit,total}$ and the characteristics of trees. The best relationship with $TM_{crit,total}$ was found by Stepwise Regression and differences between regressions according to soil type were tested by analysis of covariance. We also carried out analyses of variance in order to investigate differences in allometry and MOR between trees according to soil conditions.

Results

Only nine of the 56 trees failed in the stem. Failure occurred at ground level for four trees, at 4 - 10% of the height of the lever arm for four others (mean failure height = $7.2\% \pm 2.6$) and at 28% for one tree. Four failures, in dry Lande, showed numerous lengthwise splits with no movement of the soil-root plate. Three stem failures in wet Lande showed breaks with movement of the soil-root plate also occurring. Only two failures, one in each type of Lande, showed a clean horizontal break indicating a defect in the wood.

Table 4: Significant Pearson correlation coefficients at 0.05 level between tree characteristics, soil moisture and $TM_{crit,total}$ (56 winched trees)

Variables	P value	R ²
DBH (cm)	0.001	+ 0.90
DBH ³ (cm ³)	0.001	+ 0.94
Tree height (cm)	0.001	+ 0.73
Stem taper [H/DBH]	0.001	- 0.51
[H x DBH ²] (cm ³)	0.001	+ 0.96
Depth of the soil-root plate	0.001	+ 0.65
Volume of the soil-root plate	0.001	+ 0.83
Vertical asymmetry of the soil-root plate gravity centre	0.073	+ 0.39
Horizontal asymmetry of the soil-root plate gravity centre	0.230	+ 0.25
Total cross area of the lateral roots measured (m ²)	0.010	+ 0.42
Stem weight (kg)	0.001	+ 0.95
Crown weight (kg)	0.001	+ 0.92
Basal sweep (degrees)	0.060	- 0.26
Soil moisture	0.750	< 0.01

These correlations are linked to tree size. If variables are standardised, then no relation is significant.

Using stepwise regression the variable [H x DBH²] was found to be the best variable to explain the variability of $TM_{crit,total}$.

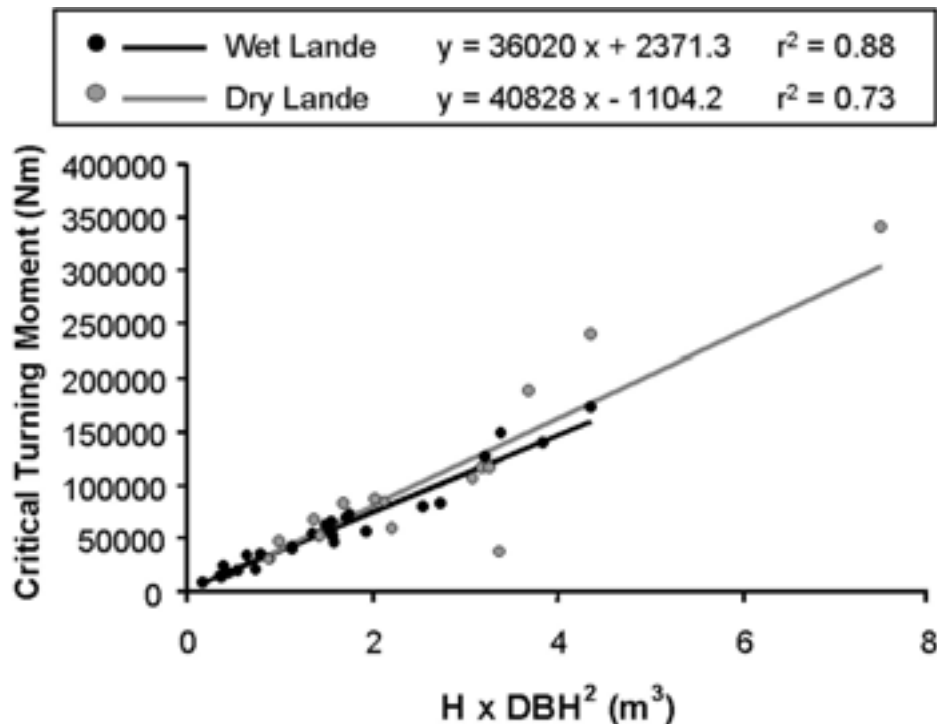


Fig. 2: Regressions between Critical Turning Moment and [H x DBH²]. Lines show weighted regressions performed by SAS software for the two soil conditions (n = 45 uprooted trees).

Linear regression between $TM_{crit,total}$ and $[H \times DBH^2]$ allowed a comparison of the mechanical behaviour of root anchorage of Maritime pine according to soil conditions (Fig. 2). The two regression intercepts were not forced through zero in order to not influence the slope values for the covariance analyses. Regressions were weighted in order to assume the homogeneity of the residuals at 0.01 level (Levene test and t test) and compare the two slopes according to soil conditions. The value of each point was weighted by the $[H \times DBH^2]$ classes. Covariance analysis showed no effect of soil condition on $TM_{crit,total}$ ($p = 0.69$ for slopes comparison and $p = 0.74$ for intercepts).

Some characteristics of the soil-root plates were related to $TM_{crit,total}$ residuals in order to explain the residual variability of anchorage resistance. No significant correlations with soil-root plate dimensions, total cross-area of the lateral roots or root number were found. Moreover, variability of $TM_{crit,total}$ was not related to the presence of a tap root.

Allometric differences according to soil conditions were tested by variance analysis (Table 5). The relative crown length was longer in wet Lande compared to dry Lande, hence the repartition of aerial weight between the stem and crown was different. Tested trees in wet Lande showed a higher basal sweep. Initial lean of the trees was not significantly correlated to DBH. Soil moisture depended both on soil conditions and on dates of winching tests ("date" effect highly significant, $p < 0.001$). These values showed low soil humidity, apart from Eperville ($15.7 \pm 5.0\%$).

Table 5: Allometric characteristics of trees according to soil type. Variables showing a significant relationship to tree size were used as relative (*). The "+" assigned to horizontal and vertical asymmetries of soil-root plates corresponds to a centre of gravity offset to the south and east respectively. Values indicate the percentage of offset respectively relative to the soil-root plate width and height. Means with the same letter do not differ significantly at the 0.05 level as indicated by Analysis of Variance and Bonferroni groups.

Variable	Lande		Wet		Dry	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Relative length of crown (%)	44.4 a	± 12.6	30.3 b	± 4.2		
Basal sweep (°)	7.4 a	± 4.2	4.7 b	± 3.6		
Basal rotation at critical point of uprooting (°)	5.4 a	± 5.4	1.7 a	± 1.4		
Vertical asymmetry of soil-root plate	+ 7.7 a	± 7.7	+ 4.5 a	± 9.6		
Horizontal asymmetry of soil-root plate	+ 0.8 a	± 6.5	- 1.7 a	± 5.9		
Stem weight*/Total tree weight ratio	0.82 a	± 0.06	0.86 a	± 0.03		
Crown weight*/ Total tree weight ratio	0.18 a	± 0.06	0.14 a	± 0.03		
Rooting depth*/DBH ratio	2.52 a	± 0.63	2.74 a	± 0.73		
Soil-root plate volume*/Stem volume ratio	2.68 a	± 0.89	1.99 a	± 0.88		
Total area of lateral root cross-sections*/Soil-root plate area ratio	0.31a	± 0.26	0.31a	± 0.23		
Soil moisture (%)	10.4 a	± 4.6	6.5 b	± 2.0		

Modulus of Rupture calculated on trees which failed in stem during winching did not differ significantly between wet and dry Lande ($p = 0.072$; homogeneity of variance respected at 0.05 level, Levene test $p = 0.11$). Mean MOR of the nine broken trees was 18.99 ± 6.17 MPa, with 13.17 MPa as minimum and 34.20 MPa as maximum. MOR on standing trees represented 53% of the theoretical MOR (clear green wood = 36 MPa).

Discussion

The use of winching to carry out bending tests on trees is a useful technique to compare the strength of root anchorage, even though this method does not accurately simulate wind loading, due to the lack of dynamic sway (Oliver and Mayhead 1974). Furthermore, O'Sullivan and Ritchie 1993 did not find any differences in anchorage strength between cyclic and static loading, nor did Coutts 1983 find differences in the type of damaged roots between winched or windblown trees.

As found by Fraser 1962, Somerville 1979, Papesch et al 1997, Gardiner et al 2000, Meunier et al 2002, $TM_{crit,total}$ was correlated to tree size, and particularly to stem weight or stem volume. For Maritime pine trees the stem volume expression $[H \times DBH^2]$ was the best predictive variable, as also found by Moore and Quine 2000 for *Pinus radiata*. Using $[H \times DBH^2]$, limits errors due to stem weight estimation and also allows the use of typical variables which can be measured directly in the field.

Fraser 1962 found that the drainage for *Picea sitchensis* and *Pseudotsuga taxifolia* increased $TM_{crit,total}$. The author linked the rooting depth to the mechanical resistance of anchorage. The vertical root growth of Maritime pine is also affected by the drainage and the presence of an iron pan horizon (Danjon et al 1999). In this study, for Maritime pine trees with same dimensions in height and DBH, the $TM_{crit,total}$ was not modified according to the type of Lande. No differences in rooting depth between the two Landes were observed. In dry Lande, as in wet Lande, the iron pan horizon could be present locally, therefore resulting in highly variable rooting depths. Furthermore, in dry Lande, we observed only quite shallow rooting depths (1.5 m max. for a 56 year old tree) similar to that found in wet Lande. For these silvicultural conditions, the presence of tap root was not related to the anchorage resistance for the oldest trees. Moreover, for the anchorage strength, the size of the tap root was small compared to tree size.

Nevertheless, even if we did not observe a difference in anchorage resistance between the two types of Landes, the number of trees which failed in the stem and the different failure types showed that some trees growing in dry Lande were better anchored than trees growing on wet Lande. As the MOR was not different between the two Landes and the size of the broken trees did not differ compared to the uprooted trees, the trees which failed in the stem with lengthwise splits may have possessed better anchored root systems.

The curves of tree mechanical behaviour show a critical loading point reached at the beginning of the winching test, when the stem lean was small, particularly in the oldest trees. As this critical loading point, the turning moment due to tree weight represents a mean of $8.6 \pm 5\%$ of the $TM_{crit,total}$ as also shown by Papesch et al 1997 for *Pinus radiata*. We can assume that this $TM_{crit,total}$ is explained by the strength of the lateral roots on the windward side of the tree. Mickovski and Ennos 2002 showed that in Scots pines growing on clay soil the tap and sinker roots represented the major components of anchorage. Even if Scots pine can be considered a species similar to Maritime pine, the rooting depth is limited in the Landes, therefore the lateral roots could play a major role in anchorage strength. We did not observe any correlation between $TM_{crit,total}$ residuals and the total area of lateral root cross-sections, however more accurate characteristics of these roots (e.g. I and T beam taper or architectural characteristics) would be more useful in highlighting the strength of these roots.

The relation $TM_{crit,total}$ versus $[H \times DBH^2]$ could be used in mechanistic models predicting wind risk (Gardiner et al 2000). ForestGALES[®] is one of these mechanistic models already implemented as a software. In order to use ForestGALES[®] as a forest management tool, we plan to include Maritime pine as a new species, along with various silvicultural conditions, in much the same way as Ruel et al (2000) working with *Abies balsamea*.

Acknowledgements

This research was supported by GIP ECOFOR (contract n° 2002.09). The authors thank E. Borg, B. Issenhuth, H. Lataillade, H. Bignalet, N. Cheval, (INRA, UE Hermitage, France), M. Chassagne (UMR LRBB, Bordeaux, France), J.Y. Fraysse (AfoceL Sud-Ouest, France) for their helpful assistance with fieldwork; A. Denis and R. Lastennet (CDGA, Bordeaux, France) for their aid with soil measurements and T. Fourcaud (UMR LRBB, Bordeaux, France) for his comments and critique of this study.

References:

- Coutts, M.P., 1983: Root architecture and tree stability, *Plant & Soil*, Vol. 71, pp.171-188
- Coutts, M.P., 1986: Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil, *Forestry*, Vol. 59, No. 2, pp.173-197
- Danjon, F., Bert, D., Godin, C., Trichet, P., 1999: Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod, *Plant & Soil*, Vol. 217, No. 1/2, pp.49-63
- Fraser, A.I., 1962: The soil and roots as factors in tree stability, *Forestry*, Vol. 35, pp.117-127
- Fredericksen, T.S., Hedden, R.L., Williams, S.A., 1993: Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 23, No. 9, pp.1760-1765
- Gardiner, B.A., Peltola, H., Kellomaki, S., 2000: Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees, *Ecological Modelling*, Vol. 129, No. 1, pp.1-23
- Jolivet, C., Arrouays, D., Andreux, F., Leveque, J., 1997: Soil organic carbon dynamics in cleared temperate forest spodosols converted to maize cropping, *Plant & Soil*, Vol. 191, No. 2, pp.225-231
- Meunier, S., Ruel, J.C., Laflamme, G., Achim, A., 2002: Résistance comparée de l'épinette blanche et du sapin baumier au renversement, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 32, No. 4, pp.642-652
- Mickovski, S.B., Ennos, A.R., 2002: A morphological and mechanical study of the root systems of suppressed crown Scots pine *Pinus sylvestris*, *Trees-Struct. & Funct.*, Vol. 16, No. 4/5, pp.274-280
- Moore, J.R., 2000: Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types, *Forest Ecology & Management*, Vol. 135, No. 1/3, pp.63-71
- Moore, J., Quine, C.P., 2000: A comparison of the relative risk of wind damage to planted forests in Border Forest Park, Great Britain, and the Central North Island, New Zealand, *Forest Ecology & Management*, Vol. 135, No. 1/3, pp.345-353
- Morgan, J., Cannell, M.G.R., 1994: Shape of tree stems - a re-examination of the uniform stress hypothesis, *Tree Physiology*, Vol. 14, No. 1, pp.49-62
- Oliver, H.R., Mayhead, G.J., 1974: Wind measurements in a Pine forest during a destructive gale, *Forestry*, Vol. 47, No. 2, pp.185-194
- O'Sullivan, M.F., Ritchie, R.M., 1993: Tree stability in relation to cyclic loading, *Forestry*, Vol. 66, No. 1, pp.69-82
- Papesch, A.J.G., Moore, J.R., Hawke, A.E., 1997: Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests, *New Zealand Journal of Forestry Science*, Vol. 27, No. 2, pp.188-204
- Peltola, H., Kellomaki, S., Hassinen, A., Granander, M., 2000: Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland, *Forest Ecology & Management*, Vol. 135, No. 1/3, pp.143-153
- Petty, J.A., Worrell, R., 1981: Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow, *Forestry*, Vol. 54, No. 2, pp.115-128
- Porté, A., Bosc, A., Champion, I., Loustau, D., 2000: Estimating the foliage area of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown, *Annals of Forest Science*, Vol. 57, No. 1, pp.73-86
- Ray, D., Nicoll, B.C., 1998: The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce, *Forestry*, Vol. 71, No. 2, pp.169-182
- Ruel, J.C., Quine, C.P., Meunier, S., Suarez, J., 2000: Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGales model, *Forestry Chronicle*, Vol. 76, No. 2, pp.329-337
- Savill, P.S., 1983: Silviculture in windy climate, *Forestry Abstracts*, review article No. 44, pp.473-488
- Smith, V.G., Watts, M., James, D.F., 1987: Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 17, No. 9, pp.1080-1091
- Somerville, A., 1979: Root anchorage and root morphology of *Pinus radiata* on a range of ripping treatments, *New Zealand Journal of Forestry Science*, Vol. 9, No. 3, pp.294-315
- Stokes, A., 1999: Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement, *Plant & Soil*, Vol. 217, No. 1/2, pp.17-27
- Stone, E.L., Kalisz, P.J., 1991: On the maximum extent of tree roots, *Forest Ecology & Management*, Vol. 46, No. 1-2, pp.59-102
- Trichet, P., Jolivet, C., Arrouays, D., Loustau, D., 1997: Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime, *in: De la forêt cultivée à l'industrie de demain*, edited by ARBORA, Bordeaux, pp.23-44.
- Wood, C.J., 1995: Understanding wind forces on trees, *in: Wind and Trees*, edited by Coutts, M.P., Grace, J., Cambridge University Press, Cambridge, pp.133-164
- Young, D.F., 1972: *Introduction to applied mechanics*, Iowa State University Press, Ames

V. CUCCHI (INRA), A. STOKES (LRBB), C. MEREDIEU (INRA),
 F. de COLIGNY (INRA), J. SUAREZ (Forestry Commission), B.A. GARDINER (Forestry Commission),
 D. BERT (INRA), S. BERTHIER (LRBB), B. COURBAUD (CEMAGREF), A. DENIS (CDGA), M. NAJAR (AFOCEL),
 Site Forêt-Bois, 69 Rte d'Arcachon, 33612 CESTAS Cedex - France <http://www.pierroton.inra.fr/cucchi@pierroton.inra.fr>,
meredieu@pierroton.inra.fr, stokes@lrbb3.pierroton.inra.fr
 Project Web Page: <http://lrbb3.pierroton.inra.fr/capforet/capforet.htm>

An expert system is being developed to determine tree stability with regards to wind storms for Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands in the "Landes de Gascogne" region of south-west France.

ForestGALES: a wind risk assessment model

ForestGALES predicts the return period of the critical strong wind speed able to uproot or break the average tree of the stand, using stand characteristics and exposure to wind (Gardiner *et al.*, 2000).

The model is implemented as a software by the Forestry Commission. It calculates the wind risk for 18 different species growing on different silvicultural conditions used in Great Britain and N. Europe.

CAPSIS: a platform for stand growth simulations

CAPSIS is an object-oriented software environment designed for hosting a wide range of forest dynamics, stand growth and yield models from various French research organizations. This software allows the evolution of forest ecosystems and stand intervention mechanisms to be studied (Coligny *et al.*, 2003). Amongst growth models implemented in CAPSIS, there is a model (PP3) for pure even-aged stands of Maritime Pine (Lemoine, 1991; Dreyfus, 1997) in the Landes region of France. PP3 is a distance-independent tree growth model with whole-stand growth regulation. It allows the growth of real or virtual stands to be simulated and gives dendrometric information along a silvicultural scenario for tree and stand levels.

ForestGALES Batch Mode



Inputs are similar to yield tables: each line gives a stand dendrometric description, soil and cultivation type and the exposure to wind for a stand of a given age.

Outputs give the return period of critical wind speed for breakage and overturning for each stand description of the input table.

Building the expert system: methodology

Static winching tests on field

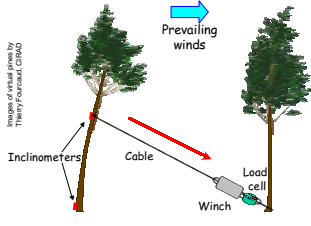
In order to adapt the ForestGALES model to include a new species, e.g. Maritime pine, it is necessary to determine the species' mechanical behaviour depending on local silvicultural conditions:

♦ **Trees in a variety of stands** were pulled sideways until failure (uprooting or stem breakage) using a winch. Applied tension and leaning angle were recorded during winching. Stem taper, crown dimensions, biomass and the position and diameter of each living branch were measured.

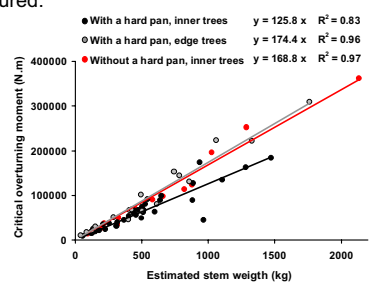
Sampling of uprooted trees during winching in springs 2002 and 2003

Study site	Tree age (years)	Number of trees	Mean stand DBH (cm)	Mean stand H (m)	Winched trees which failed in roots		
					Growing with a hard pan inner edge	level	Growing without a hard pan outer edge
D. France	15	1133	17.8	11.3	5	6	3
Caploux	20	545	19.6	15.2	...	...	...
Lud	29	427	25.8	18.8	10	...	...
Eperville	31	184	30.3	20.8	5	1	...
Coyles	37	250	36.2	24.1	3	5	4
Comelyns	45	383	39.7	23.2	6	7	...
Calan	50	127	38.7	25.2	3	...	8 3

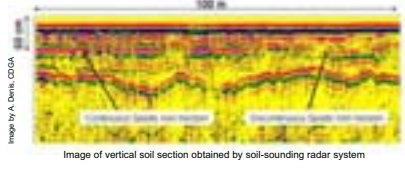
A total of 70 trees were uprooted during winching tests



The first relationship needed by the ForestGALES model is a linear regression predicting the critical overturning moment with the tree stem weight according to silvicultural conditions.



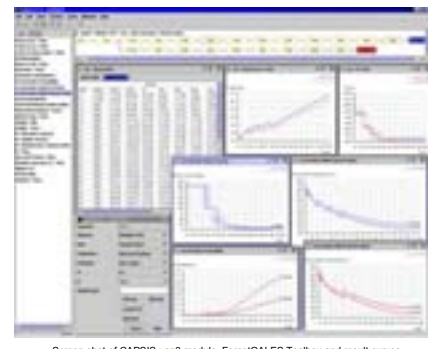
- ♦ **Soil studies** were carried out on the experimental sites:
 - **Soil moisture** on site
 - **Drainage capacity** of a soil section between 0 - 0.40 m depth
 - **Soil permeability** of a soil section between 0 - 0.40 m depth
 - A soil-sounding radar system was used to determine the **depth and homogeneity** of the **spodic iron horizon (hard pan)**.



Software connection

Instead of using yield tables of *Pinus pinaster* as input to ForestGALES, a connection between the two softwares allows us to use the *Pinus pinaster* growth model hosted by CAPSIS, to create any required scenarios of silviculture and then obtain tree characteristics at the stand or individual level.

CAPSIS uses the ForestGALES functions, which calculate the critical wind speed for uprooting and stem breakage for each step of the simulated silvicultural scenarios. CAPSIS then allows the visualisation of the results and comparisons between the effects of each silviculture on wind risk.



Following steps

- ♦ **end of the calibration** for all the species-dependent relationships asked by the ForestGALES model.
- ♦ **simulations:** effects of silviculture on stand stability and evaluation of the sensitivity at both the stand and individual scale.
- ♦ **integration of aerodynamic data** for *Pinus pinaster* (VENFOR Project, Y. Brunet - INRA, T. Fourcaud - CIRAD, France).
- ♦ **confrontation** between wind risk results simulated by the model and real data of the stands damaged by the 1999 storm (Cucchi and Bert, 2003).

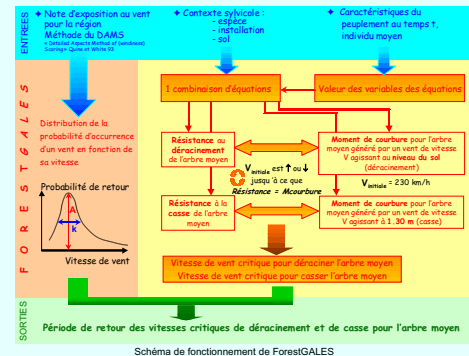
V. CUCCHI (INRA), A. STOKES (LRBB), C. MEREDIEU (INRA),
 F. de COLIGNY (INRA), J. SUAREZ (Forestry Commission), B.A. GARDINER (Forestry Commission),
 D. BERT (INRA), S. BERTHIER (LRBB), B. COURBAUD (CEMAGREF), A. DENIS (CDGA), M. NAJAR (AFOCOL),
 Site Forêt-Bois, 69 Rte d'Arcachon, 33612 CESTAS Cedex - France <http://www.pierroton.inra.fr/>
 cucchi@pierroton.inra.fr, meredieu@pierroton.inra.fr, stokes@lrbb3.pierroton.inra.fr
 Page Web : <http://lrbb3.pierroton.inra.fr/capforet/capforet.htm>

Un système d'expertise de la stabilité des peuplements forestiers destiné aux gestionnaires de peuplements de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) dans les Landes de Gascogne a été développé lors de ce projet.

ForestGALES : un modèle d'évaluation des risques liés au vent



Connaissant les caractéristiques dendrométriques et l'exposition au vent d'un peuplement, **ForestGALES** calcule la **période de retour des vitesses de vent critiques** pour déraciner ou casser l'arbre moyen (Gardiner *et al.*, 2000).



Le modèle est développé sous forme d'un logiciel par la Forestry Commission. Il est actuellement paramétré pour 18 essences différentes pour les conditions de culture du Royaume Uni.

Mode « batch » de ForestGALES



Copie d'écran de ForestGALES

CAPSIS : une plate-forme de simulation pour les modèles de dynamique forestière



CAPSIS est une plate-forme de simulation pour l'étude de la **production et la dynamique des peuplements forestiers**. Elle héberge des **modèles dendrométriques de dynamique forestière adaptés à des essences forestières et/ou des formations forestières et propose des outils pour procéder à des interventions (régénération, éclaircie, coupes)** (Coligny *et al.*, 2003). Parmi ces modèles, elle héberge un **modèle de croissance pour les peuplements de Pin maritime** (Lemoine, 1991 ; Dreyfus, 1997). PP3 est de type « arbre dans peuplement, sans spatialisaton ». Il permet de simuler la croissance de peuplements réels ou virtuels et de fournir les informations au cours du temps au niveau arbre et peuplement.

Les **entrées** sont de type « **table de production** » : chaque ligne donne les caractéristiques dendrométriques, la description de la station et l'exposition au vent d'un peuplement à un âge donné.

Les **sorties** indiquent les **périodes de retour** de la vitesse critique de casse et de déracinement correspondant à chacune des lignes en entrée.

Création du système d'expertise : méthodologie

Essais de flexion sur le terrain

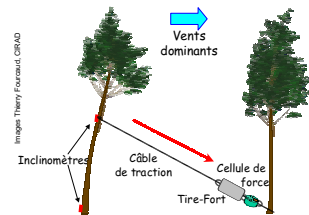
De façon à inclure le Pin maritime dans ForestGALES, le **comportement mécanique de cette essence** en fonction des conditions sylvicoles a été étudié :

♦ **des arbres de peuplements variés** sont testés en **flexion statique** à l'aide d'un tire-fort jusqu'à la ruine (chablis ou volis). La force de traction et l'inclinaison sont enregistrées au cours de l'essai. Les circonférences le long de la tige, la branchaison, les dimensions et le poids du houppier sont ensuite mesurés.

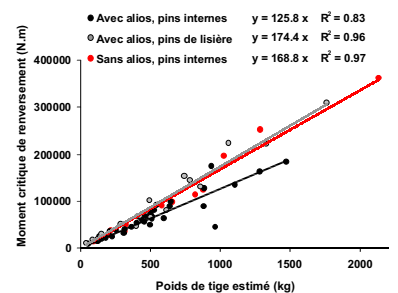
Echantillonnage des arbres testés en flexion en 2002 et 2003

Site	Age (ans)	Densité (tiges/ha)	Dg (cm)	Hq (m)	Avec alios		Sans alios	
					Interne	Lisière	Interne	Lisière
D. France	15	1133	17,6	11,3	9	6	..	..
Caplieux	20	945	19,6	15,2	..	..	3	..
Luâ	29	427	25,8	18,8	10	..	..	..
Eperville	31	94	35,3	20,8	5	1	..	..
Coyole	47	280	36,2	21,4	2	5	4	..
Camelayre	49	383	39,7	23,2	6	7	..	..
Callen	50	127	38,7	25,2	3	..	6	3

Sur 100 arbres testés, 70 se sont déracinés

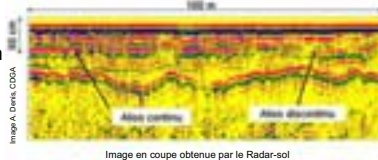


Les **relations** exigées par ForestGALES sont **modélisées**, notamment la relation entre le **moment critique de déracinement** et le **poids de la tige**.



♦ **des études de sol** sont réalisées sur les mêmes sites :

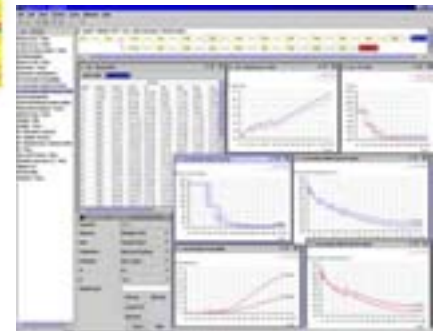
- Mesure des **teneurs en eau in situ**
- Évaluation de la **capacité de drainage** sur une tranche de 0-0,40 m
- Estimation de **perméabilité du sol** sur cette tranche
- Utilisation du Radar-sol pour déterminer la **position** et la **continuité de la formation aliosique**



Connexion des logiciels

Au lieu d'utiliser des **tables de production** en entrée de ForestGALES, le couplage entre les deux logiciels permet d'exploiter la capacité de CAPSIS et du modèle Pin maritime à **générer une multitude de scénarios sylvicoles** et d'obtenir des informations aussi bien au **niveau du peuplement que des arbres**.

CAPSIS fait appel aux **fonctionnalités de ForestGALES** qui calcule alors la vitesse de vent critique annuelle de chablis et de volis pour tous les scénarios sylvicoles préparés. CAPSIS permet ensuite de visualiser les résultats et de faire des comparaisons entre les scénarios sylvicoles.



Copie d'écran CAPSIS, module pp3, boîte à outils ForestGALES

Prochaines étapes

- ♦ **poursuite de la calibration des relations espèce-dépendantes** nécessaires au modèle Pin maritime.
- ♦ **simulations** : effets des scénarios sylvicoles sur la stabilité et évaluation de la sensibilité à l'échelle du peuplement et à l'échelle de l'arbre.

- ♦ **intégration de données aérodynamiques** du pin maritime, issues du projet « **VENFOR** » (Y. Brunet - INRA, T. Fourcaud - CIRAD).
- ♦ **confrontation** du modèle avec des données réelles de peuplements touchés par la tempête de 1999 (Cucchi et Bert, 2003).

Que savons-nous de la biomécanique racinaire ?

Alexia Stokes*, Franck Salin*, Lionel Dupuy**, Véronique Cucchi*** (1)

La biomécanique permet de mieux comprendre les composantes (mécanique, structurale, biologique) intervenant dans la stabilité. L'article expose les apports de cette nouvelle discipline.

Les systèmes racinaires des arbres ont trois rôles principaux : absorption de l'eau et des nutriments, stockage de réserves (hydrates de carbone) et ancrage de l'arbre dans le sol. Les aspects physiologiques de la montée de la sève et de la nutrition ont été abondamment étudiés depuis de nombreuses années, tandis que la biomécanique de l'ancrage racinaire n'est abordée sérieusement que depuis vingt ans. Suite aux tempêtes de ces dernières années, ce domaine de recherche suscite un intérêt accru.

Mécanique de l'ancrage racinaire

La stabilité de l'arbre face au vent est étudiée depuis longtemps par les chercheurs de la Forestry Commission en Écosse. La Grande-Bretagne pratique une sylviculture essentiellement basée sur l'épicéa de Sitka, installé sur des sols pauvres et peu profonds. De plus, cette île est fortement exposée au vent, d'où de très importantes pertes économiques dues aux chablis. Par conséquent, la Forestry Commission a mis au point des stratégies d'entretien sylvicole des parcelles favorisant l'ancrage racinaire, améliorant ainsi la stabilité de l'arbre (Gardiner et Quine, 2000).

En 1983, M.-P. Coutts a développé une méthode permettant de déterminer la résistance de l'arbre au vent et de calculer l'importance de chaque composante pour l'ancrage racinaire. Pour cela, il a réalisé des essais de flexion sur des épicéas de Sitka adultes. Dans un premier temps, l'arbre est tiré latéralement à l'aide d'un tire-fort et la force nécessaire pour le faire tomber est mesurée par un capteur de force. Lorsque le tronc d'un arbre est déplacé horizontalement, les racines situées du côté du vent sont soulevées et mises sous tension, tandis que les racines qui se trouvent du côté opposé au vent s'appuient sur le sol et subissent une compression. Les racines latérales fléchissent pour résister à la force de traction exercée par le tire-fort. Les racines verticales dans le sol sont soit soulevées, soit déplacées latéralement (Fig. 1b). Les racines perpendiculaires à la direction de flexion sont mises sous torsion, elles offrent peu de résistance au déracinement. Dans un second temps, pour calculer l'importance respective des différents types de racines pour l'ancrage, Coutts a réalisé de nouveaux essais de flexion sur des épicéas adultes, sans aller jusqu'à la rupture : il a appliqué une légère force de quelques kilonewtons (2), et a laissé revenir l'arbre à sa position verticale. Ensuite, il a coupé les racines au vent, puis les

racines sous le vent, et a répété l'opération. C'est ainsi qu'il a pu décomposer la résistance de l'ancrage racinaire en quatre séquences chronologiques :

- 1) Le poids de la plaque sol-racine : les dimensions et la cohésion de la plaque dépendent fortement du type de sol, de la profondeur et de la densité des racines, et de la symétrie du système racinaire (Fig. 1a).
- 2) La résistance au cisaillement du sol autour de la plaque racinaire : elle dépend de la profondeur de l'enracinement et de l'humidité du sol (Fig. 1b).
- 3) La résistance des racines mises sous tension : ces racines jouent un rôle d'haubanage, elles retiennent l'arbre lorsqu'il est déplacé latéralement. On peut aussi penser qu'elles servent de fixations à l'extrémité de la motte racinaire et évitent son soulèvement (Fig. 1b-1c). La morphologie et la résistance mécanique de ces racines sont des facteurs importants de la qualité de l'ancrage.
- 4) La résistance des racines mises sous flexion : les zones situées du côté opposé au vent sont comprimées par l'action des racines latérales charpentières. Ces dernières fléchissent sous l'effet de la rotation de l'ensemble de la plaque racinaire. Il est préférable d'avoir des racines de forte section car une racine qui se dédouble garde sa résistance à la traction mais divise sa résistance à la flexion par deux. Si

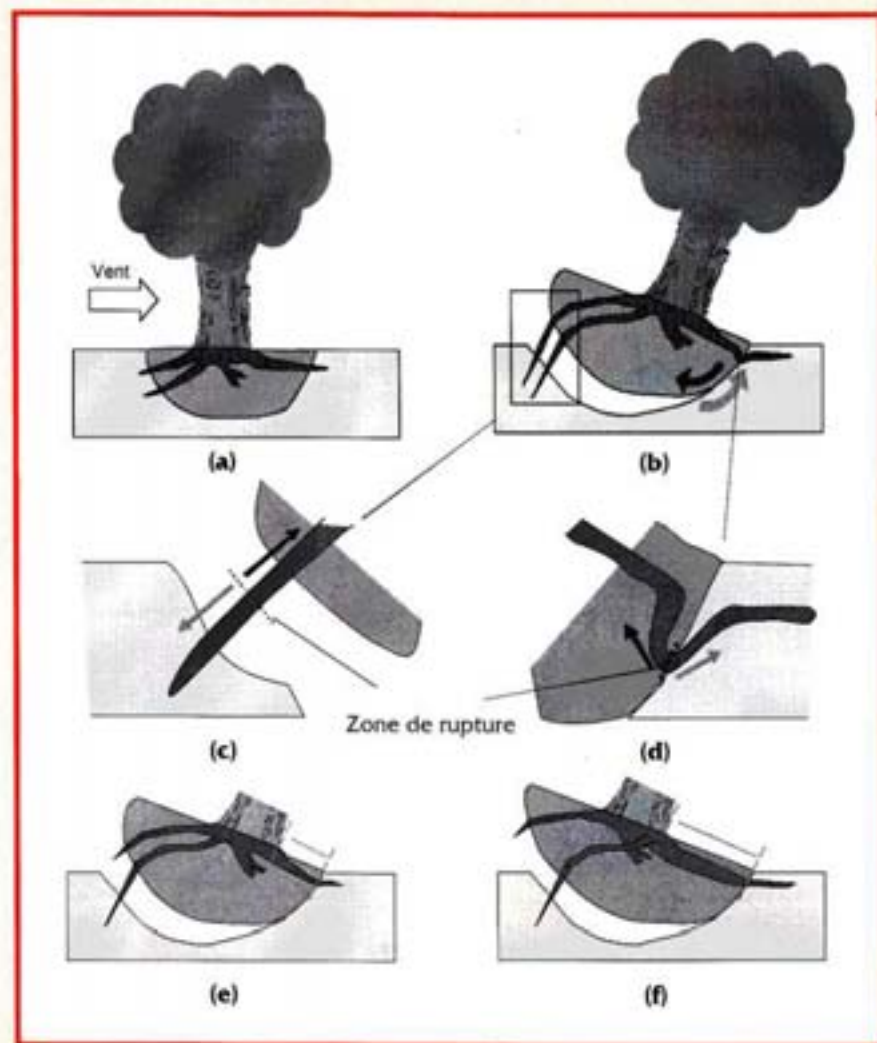


Figure 1 : Différentes composantes de l'ancrage racinaire : a) le poids de la plaque racinaire qui permet de maintenir l'arbre dans le sol (les racines adhèrent au sol). b) résistance au cisaillement du sol autour de la plaque racinaire. c) résistance des racines mises sous tension. d) résistance des racines mises sous flexion. e et f) Si les racines sous le vent sont très grosses, le point de rotation sera éloigné de l'arbre, augmentant donc le bras de levier du système racinaire et améliorant l'ancrage.

ces racines sont très grosses, le point de rotation sera éloigné de l'arbre, augmentant donc le bras de levier du système racinaire et améliorant l'ancrage (Fig. 1b, d, e, f). Cette composante de l'ancrage dépend étroitement de la masse, du diamètre vertical, de la forme et de la symétrie des racines proches de la souche de l'arbre.

Cette expérience a été répétée par d'autres chercheurs (Crook et Ennos, 1996) travaillant sur le mélèze hybride (*Larix decidua* x *L. kaempferi*), qui possède un systè-

me racinaire dit en « cœur », c'est-à-dire avec des racines latérales superficielles et obliques (pour un descriptif des systèmes racinaires traçant, cœur et pivot, voir Drexhage et al., Forêt-entreprise n°139 et 153). Les résultats sont similaires à ceux mis en évidence sur l'épicéa de Sitka, avec un ensemble racines au vent + pivots contribuant à 75 % de l'ancrage. La mesure de la distribution des contraintes apporte des éléments de compréhension supplémentaires sur les mécanismes du déracinement (Coutts et al., 1999).

Cette distribution est gouvernée par la topologie (3) et la symétrie des racines latérales :

- dans le cas des systèmes racinaires dits « traçants » - longues racines superficielles, épaisses et rigides au collet (Stokes et Mattheck, 1996) - le maximum des contraintes subies par les racines lors du déracinement est situé loin du tronc. Si elles ne sont pas distribuées de façon symétrique, ces racines sont tendues individuellement : elles cassent donc une par une ;

- dans le cas d'un système en « cœur », aux racines latérales plus ramifiées et flexibles, les contraintes sont localisées plus près du tronc et sont donc plus homogènes : la symétrie influence alors moins la résistance de l'ancrage ;

- le rôle des racines pivotantes est plus difficile à définir, pour des raisons d'expérimentation. Pendant le processus de déracinement d'un arbre, le pivot est enfoncé dans le sol côté au vent, la partie haute en rotation autour de son axe et la partie basse restant plus ou moins bien ancrée dans le sol (Figure 2). Ce mécanisme varie selon la nature du sol et l'âge de l'arbre. Les jeunes pins (3-15 ans), ont tendance à se plier pendant la flexion de la tige et ne cassent pas. Par contre, les pins plus âgés (15-25 ans) cassent souvent au niveau de la tige ou du pivot. Chez les pins adultes, on observe plutôt un déracinement de la plaque sol-racine (Stokes, 1999). Ainsi le pivot facilite l'ancrage des jeunes arbres, mais des racines latérales bien développées permettent aux arbres plus âgés de mieux résister au déracinement.

On peut aussi remarquer que les jeunes arbres ont proportionnellement plus de racines profondes que les adultes. En effet la croissance racinaire en profondeur est souvent

gênée par les conditions locales du sol, telles que la remontée de la nappe phréatique ou la présence d'une couche dure ou rocheuse à faible profondeur. Au cours de la croissance de l'arbre, l'efficacité des systèmes « pivots » diminue, mais celle des systèmes « traçants » augmente (Ennos, 1993). Le système racinaire dit en « cœur » est constitué à la fois de racines latérales et de racines verticales, il est considéré comme le système le plus efficace en terme d'ancrage racinaire (Stokes et al., 2000). À l'aide d'essais de flexion similaires à ceux de Coutts, on a observé que dans les conditions locales de l'expérience les espèces à système « cœur » tel que le chêne (*Quercus robur*) et le douglas (*Pseudotsuga menziesii*) cassent plutôt au niveau du tronc, ou à la base de la tige. En revanche, l'épicéa commun (*Picea abies*), espèce à système traçant, se déracine beaucoup plus facilement, souvent avec un soulèvement total de la plaque racinaire hors du sol. Lorsque les arbres à système

« cœur » se déracinent, la plaque racinaire a tendance à glisser dans le sol et à ne pas se soulever. Dans ce type d'expérience, si les arbres disposent d'un ancrage efficace et que la force nécessaire pour le déracinement est supérieure à celle de la rupture du tronc, l'arbre se casse au niveau du tronc. On peut supposer que des espèces à systèmes « cœur » et « pivot », cassant au niveau du tronc lors de la flexion, sont mieux ancrées que celles développant des systèmes traçants.



L'arbre peut-il améliorer son propre ancrage racinaire ?

La croissance en milieu hétérogène (avec une orientation des pressions éoliennes par exemple) peut avoir des effets sur la morphologie des plantes. Les sollicitations mécaniques peuvent également provoquer des variations du taux et de la vitesse de croissance des organes

de support, ainsi que des altérations de leurs structures (bois atypiques, excentricité de la moelle, nanisme, etc.).

Entre 1954 et 1999 une cinquantaine d'études, portant sur trente espèces, ont rapporté de telles réactions chez des plantes ligneuses sollicitées mécaniquement. Les chercheurs ont procédé à des chargements artificiels allant de l'utilisation de simples poids à celle de souffleries jusqu'aux originales machines à secouer (Telewski, 1995 ; Stokes et al., 1997). Les résultats de ces expériences traitent en premier lieu de modifications morphologiques, comme la diminution de l'élongation et l'épaississement de tiges soumises à des secousses ou ventilations. Ces modifications morphologiques sont également observées à la base des troncs et décrites par toute une terminologie faisant appel aux notions de mécanique et de morphologie : empatement, encastrement, contreforts...

Comme le laissent présager ces observations, la partie souterraine de l'arbre, par son rôle primordial d'ancrage, est particulièrement sensible aux sollicitations dynamiques du vent (Stokes, 1999). Des coupes longitudinales du système racinaire permettent de constater que les racines placées du côté des vents dominants (« au vent ») sont particulièrement nombreuses et ramifiées tandis les racines opposées (« sous le vent ») sont épaisses et clairsemées (Fig. 3). Les racines côté des vents dominants constituent 60 % de l'ancrage de l'arbre et un meilleur développement à cet endroit aidera l'arbre à mieux résister au renversement. Des coupes transverses de racines superficielles révèlent également des sections droites optimisées en termes de rigidité à la flexion, comme par

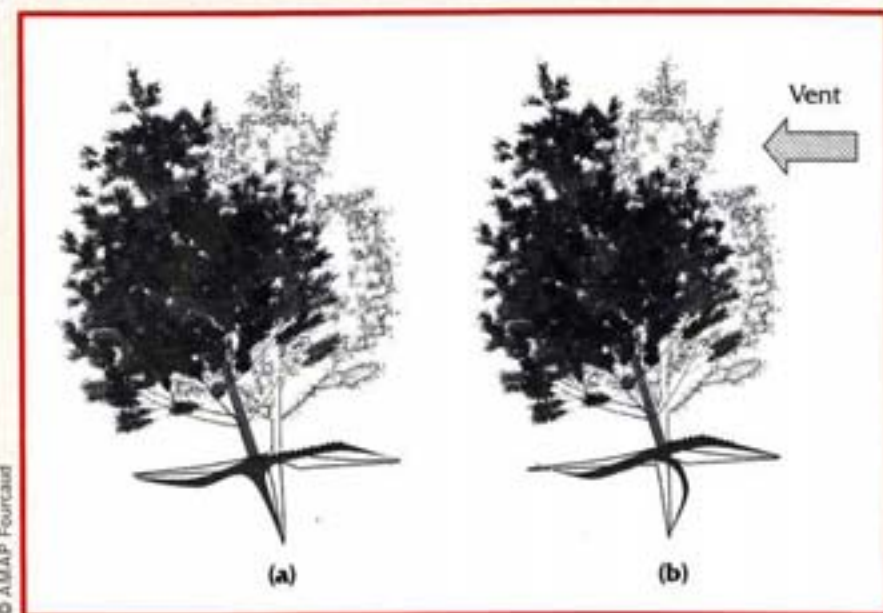


Figure 2 : Chavirement d'un arbre à racine pivotante sous l'effet du vent : le pivot peut s'enfoncer dans le sol du côté « sous le vent » de l'arbre, laissant une crevasse dans le sol du côté opposé (a). Dans certains cas, le pivot fléchit et s'enfonce dans le sol du côté « au vent » mais reste fermement ancré par ses extrémités (b).

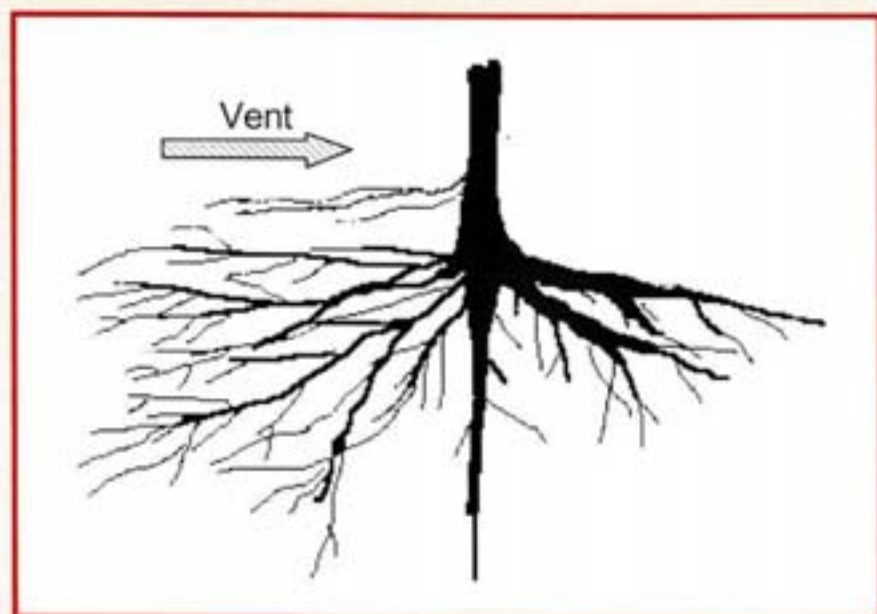


Figure 3 : Dessin illustrant les modifications architecturales racinaires d'origine éolienne, sur des plants d'1-2 ans d'épicéa de Sitka. Les racines placées dans le secteur au vent sont plus nombreuses et ramifiées tandis que celles qui prennent place dans le secteur opposé (sous le vent) sont plus épaisses avec moins de ramifications.

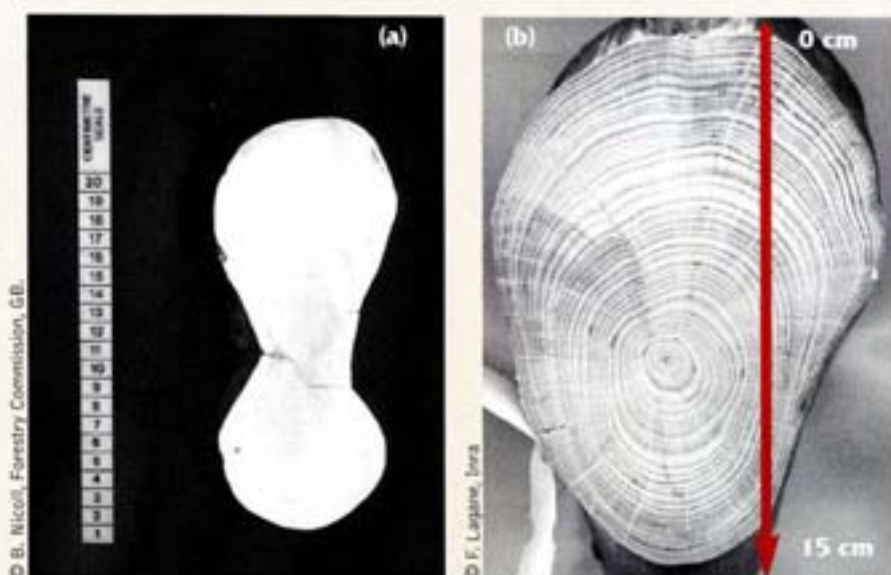


Figure 4 : Racines traçantes d'arbres âgés de 50 ans : a) d'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*) en forme de poutre en I et b) de pin maritime (*Pinus pinaster*) en forme de T.

exemple les racines dites « contre-forts » chez les arbres tropicaux. Dans ce cas, la croissance racinaire dans l'axe de la flexion est plus importante, ce qui permet à la racine de mieux résister à la rupture le long de cet axe : ces sections présentent un faciès elliptique, voire en forme de 8 ou même de I ou de T, à la manière des poutres métalliques

employées en construction (Fig. 4). De telles adaptations morphologiques s'observent de façon moins évidente au niveau de la tige : elle est de moins en moins circulaire à mesure que l'arbre vieillit, et souvent méplate (grand diamètre dans la direction des vents dominants et petit diamètre dans la direction perpendiculaire).

Conclusions

Les avancées récentes, tant en biologie (diversité architecturale des systèmes racinaires, Drénou, 2003) qu'en modélisation numérique (simulation des ancrages, Dupuy, 2003) nous permettent d'améliorer les connaissances sur la biomécanique racinaire. Les arbres au stade juvénile possèdent normalement une racine pivotante et plusieurs racines horizontales, mais au fur et à mesure de sa croissance, le pivot se développe moins vite et finit par jouer un rôle mineur dans l'ancrage de l'arbre. Un grand nombre d'espèces développent un système en cœur au stade adulte. Le renversement d'un arbre a lieu lorsque les forces appliquées par le vent sur la partie aérienne dépassent la capacité de résistance du complexe sol-racines, sans pour autant briser la tige. Des espèces à système traçant seront donc plus susceptibles de se déraciner que des espèces à système plongeant. Par contre, des arbres bien ancrés tels les jeunes individus (qui possèdent un pivot plus profond que celui des adultes par rapport à leur taille) seront plus sensibles à la casse.

Lorsque l'arbre est soumis à des sollicitations mécaniques régulières tel que le vent, il peut être amené à renforcer les zones de son système racinaire les plus sollicitées mécaniquement. Il améliore ainsi sa stabilité et limite le risque de renversement ou de casse (surtout chez les arbres à système traçant) en modifiant sa morphogenèse en terme d'épaisseur ou de distribution des racines.

Les questions dont nous devons traiter concernent le rôle du pivot dans l'ancrage racinaire, surtout

chez les arbres cultivés dans des sols limitant le développement de ce pivot par la présence d'un horizon trop compact à faible profondeur, ou par la remontée saisonnière de la nappe phréatique. Le pivot est alors souvent très court et épais, et ne joue qu'un rôle mineur dans l'ancrage. Dans ce cas, vaut-il mieux sectionner le pivot chez les jeunes arbres au moment de la plantation, afin de favoriser le développement des racines latérales ? Si le système cœur est bien le système le plus résistant au renversement, peut-on améliorer la stabilité des arbres en modifiant les pratiques sylvicoles (élagage racinaire, travail du sol, etc.) ?

À l'aide de modèles numériques, nous commençons à répondre à ces questions. Néanmoins, il nous faut tout d'abord identifier les facteurs de stabilité principaux chez l'essence considérée, et savoir où et comment l'arbre sera planté et géré par

la suite (forêt de plantation, parc ou jardin), avant de tenter d'appliquer une méthode de gestion particulière. Par exemple, un système d'expertise destiné aux forestiers (ForestGales) existe déjà en Écosse. Ce logiciel permet de calculer la période de retour des vitesses de vent critiques susceptibles de déraciner ou casser l'arbre moyen d'un peuplement, et ceci pour plusieurs espèces. Ce dernier est en cours d'adaptation pour la forêt landaise (<http://lrbb3.pierroton.inra.fr/capforet/capforet.htm>). ■

Remerciements

Ce travail a été financé par le projet Européen ECO-SLOPES (QLK5-2001-00289), et les projets CapForêt et Peuplier (projets Gip Ecofor).

Résumé

Suite aux tempêtes de ces dernières années, les études portant sur la stabilité de l'arbre dans son milieu se sont fortement développées. Aujourd'hui de nombreuses recherches s'orientent vers la biomécanique de l'ancrage des systèmes racinaires afin de mieux comprendre les composantes (mécanique, structurale, biologique) intervenant dans la stabilité.

Mots-clés : biomécanique, ancrage racinaire, vent, racine.

(1) *Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, (Unité Mixte : Inra/CNRS/Université Bordeaux I), Domaine de l'Hermitage, 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas cedex.

**IDF Bordeaux, 6 Parvis des Chartrons, 33075 Bordeaux cedex

***Unité EPHYSE, Inra Pierroton, Domaine de l'Hermitage, 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas cedex

(2) 1 000 newtons, soit l'équivalent d'une masse de 100 kg.

(3) Topologie : position relative des objets indépendamment de leur forme, de leur localisation et de leur taille (géométrie de position).

Bibliographie

- **Coutts (M.-P.), 1983.** *Root architecture and tree stability.* Plant Soil 71 : 171 - 188.
- **Crook (M.-J.), Ennos (A.-R.), 1996.** *The anchorage mechanics of deep-rooted larch Larix europea x L. japonica.* J. Exp. Bot 47, p. 1509-1517.
- **Drénou (C.), 2003.** *Typologie et variations de l'enracinement des arbres adultes.* Forêt-entreprise 153, p. 27-33.
- **Dupuy (L.), 2003.** *Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers.* Thèse de doctorat. Université de Bordeaux I. 128 p.
- **Ennos (A.-R.), 1993.** *The scaling of root anchorage.* J. Theor. Biol. 161, p. 61-75.
- **Gardiner (B.-A.), Quine (C.), 2000.** *Management of forests to reduce the*

risk of wind damage – a review with particular reference to the effects of strong winds. For. Ecol. Mgmt. 135, p. 261-277.

■ **Stokes (A.), Mattheck (C.), 1996.** *Variation of wood strength in roots of forest trees.* J. Exp. Bot 47, p. 693-699.

■ **Stokes (A.), Nicoll (B.-C.), Coutts (M.-P.), Fitter (A.-H.), 1997.** *Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition : effects on biomass allocation, root development and resistance to bending.* Can. J. For. Res. 27, p. 1049-1057.

■ **Stokes (A.), 1999.** *Strain distribution during anchorage failure in root systems of Maritime pine (Pinus pinaster Ait.) at different ages and tree growth*

response to wind-induced root movement. Plant and Soil, 217, p. 17-27.

■ **Stokes (A.), Drexhage (M.), Gultard (D.-G.), 2000.** *A method for predicting the site of failure in trees under mechanical loading.* In : Stokes (A.), ed. *The Supporting Roots of Trees and Woody Plants : Form, Function and Physiology.* Developments in Plant and Soil Sciences N° 87, Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, p. 279-285.

■ **Telewski (F.-W.), 1995.** *Wind-induced physiological and developmental responses in trees.* Dans : « Wind and Trees » (M.-P.) Coutts, (J.) Grace, eds., Cambridge University Press, p. 237-263.

RÉSUMÉ

Dans les forêts de production, le vent génère des dégâts provoquant d'importantes pertes économiques. Or les réactions des peuplements forestiers à l'action physique du vent sont encore mal connues, car elles mettent en jeu un ensemble de processus complexes imbriqués à différentes échelles.

L'objectif de cette thèse était de dégager des pistes pour la compréhension des principaux facteurs sylvicoles et environnementaux influençant la sensibilité au vent des peuplements de Pin maritime, cultivés dans les Landes de Gascogne pour la production de bois. Trois approches complémentaires ont été utilisées : i) l'analyse comparative de dégâts de tempête sur deux dispositifs expérimentaux, ii) l'expérimentation de la résistance de l'ancrage racinaire dans le contexte pédologique du massif landais en utilisant des essais de flexion en statique, et iii) la modélisation de vitesses critiques de vent pour des peuplements simulés de Pin maritime d'âge et de scénario sylvicole donnés.

A l'échelle du peuplement, l'analyse comparative et la modélisation ont montré que la résistance au vent dépend à la fois de l'âge du peuplement et de la densité d'arbres. L'observation des dégâts causés par la tempête de 1999 a révélé que cette densité, en déterminant les caractéristiques dendrométriques des pins, influence de façon complexe la résistance globale du peuplement et la résistance individuelle des arbres. A l'échelle des arbres, les essais de flexion ont mis en évidence l'effet de la position spatiale sur la résistance individuelle : les pins de lisière exposés aux vents dominants résistent mieux à l'arrachage que les pins ayant poussé à l'intérieur du peuplement.

Des améliorations du modèle de prédiction des vitesses critiques obtenu sont proposées, dans une double optique d'outil de recherche et d'outil d'aide à la gestion. Une réflexion sur la prise en compte du risque forestier lié au vent est engagée.

Mots-clés : *Pinus pinaster - Tempête - Biomécanique - Sylviculture - Ancrage racinaire - Stabilité de l'arbre - Moment de flexion - Vitesse critique de vent*

ABSTRACT

Wind vulnerability in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.).

A comparative analysis of windthrow and a study of overturning resistance through experimental analysis and numerical modelling.

In managed forests, trees damaged by wind can represent significant economic losses. The response of forest stands to wind loading during storm is still partly unknown, as it is the result of a set of complex processes overlapping at different scales.

This thesis aims to highlight the main silvicultural and environmental factors influencing sensitivity to wind of even-aged Maritime pine stands, which are intensively cultivated for wood production in southwest France. Three complementary approaches were used: i) comparative analysis of wind damage on two experimental stands, ii) static winching tests in order to determine mechanical resistance of root anchorage according to podzolic soil conditions found in the "Landes de Gascogne" region, and iii) modelling the critical wind speed for simulated stands of Maritime pine according to age and silvicultural scenario.

At the stand scale, observation of damage and modelling simulations showed that sensitivity to wind depended both on stand age and stand density. A comparative analysis of damage after the 1999 storm indicated that stand density, which controls tree size characteristics, have complex effects on global stand and individual tree resistance. At the tree scale, winching tests showed a significant effect of spatial position of the tree on its individual resistance, as edge trees exposed to prevailing wind were better anchored than trees growing inside the stand.

Some improvements are proposed for the model obtained, with two objectives, a scientific tool and an expert system intended to assist foresters. Finally, perspectives for taking into account wind risk in forest management are presented.

Keywords: *Pinus pinaster - Storm - Tree pulling - Silviculture - Root anchorage - Tree stability - Bending moment - Critical wind speed*